



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | データセンタエクスチェンジを実現する光パス自動設計・制御技術                                                                  |
| Author(s)           | 西沢, 秀樹                                                                                          |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                           |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                          |
| Dissertation Number | 甲第16514号                                                                                        |
| Issue Date          | 2025-03-25                                                                                      |
| DOI                 | <a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.k16514">https://doi.org/10.14943/doctoral.k16514</a> |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/95189">https://hdl.handle.net/2115/95189</a>               |
| Type                | doctoral thesis                                                                                 |
| File Information    | Hideki_Nishizawa.pdf                                                                            |



# 博士論文

## データセンタエクスチェンジを実現する 光パス自動設計・制御技術

北海道大学大学院 情報科学院

西沢 秀樹

# 目次

|     |                                             |    |
|-----|---------------------------------------------|----|
| 1   | 序論                                          | 3  |
| 1.1 | 研究背景                                        | 3  |
| 1.2 | 本研究の目的・課題・目標                                | 22 |
| 1.3 | 本論文の概要と構成                                   | 27 |
| 2   | Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャ技術               | 29 |
| 2.1 | はじめに                                        | 29 |
| 2.2 | 提案する Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャ            | 35 |
| 2.3 | 提案したアーキテクチャの利点と実績                           | 43 |
| 2.4 | まとめ                                         | 50 |
| 3   | 伝送路の QoT に応じた自動光波長パス設計技術                    | 52 |
| 3.1 | はじめに                                        | 52 |
| 3.2 | 特性不明のユーザーアクセスリンクを介した光パス設計と提案するアーキテクチャ・プロトコル | 57 |
| 3.3 | 全 End-to-End の光パスをオンデマンドで正確に GSNR 推定する手法    | 60 |
| 3.4 | End-to-End の GSNR 測定結果と推定誤差                 | 63 |
| 3.5 | フィールドファイバーを用いたオンデマンドな WDM プロビジョニング実験の結果     | 67 |
| 3.6 | 今後の課題                                       | 69 |
| 3.7 | まとめ                                         | 69 |
| 4   | 光ファイバーモニタ・物理レイヤモデルを用いた伝送路システム最適化技術          | 71 |
| 4.1 | はじめに                                        | 71 |
| 4.2 | 適用方式                                        | 76 |
| 4.3 | 制御アーキテクチャ                                   | 78 |
| 4.4 | 実験構成                                        | 81 |
| 4.5 | 実験結果：1 時間以内でのプロビジョニングとメンテナンス                | 83 |
| 4.6 | 故障箇所特定への応用                                  | 89 |
| 4.7 | 今後の課題                                       | 91 |
| 4.8 | まとめ                                         | 92 |

|     |                                                           |     |
|-----|-----------------------------------------------------------|-----|
| 5   | 結論                                                        | 94  |
| 6   | 付録                                                        | 98  |
| 6.1 | 相互接続可能なモードの一覧 . . . . .                                   | 98  |
| 6.2 | GN モデルの精度に関する議論と最新動向 . . . . .                            | 98  |
| 6.3 | Partially disaggregation と Fully Disaggregation . . . . . | 99  |
| 6.4 | ホワイトボックス型光送受信装置ハードウェア . . . . .                           | 99  |
| 6.5 | Cassini のトライアル・商用化 . . . . .                              | 100 |
| 6.6 | Disaggregated 400G Muxponder ”Phoenix” の標準化 . . . . .     | 101 |

# 1 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 長距離光伝送技術の歴史

長距離光伝送方式は、Time Domain Multiplexing (TDM)、Wavelength Division Multiplexing (WDM) + 光ファイバーアンプ、デジタルコヒーレントの3つの技術をトリガとして、この40年間で伝送容量が約100万倍に拡大した。革新的技術が登場するたびに、装置そのものだけでなく伝送路設計手法や最適化手法も刷新され、大容量なインフラとその運用を支えてきた。1970年の低損失ファイバーの実現や半導体レーザーの小型化によって、本格的な光通信の研究が始まり、1980年代の後半まで複数の信号を時間軸上で多重して伝送するTDM技術の研究が進んだ。1.5  $\mu\text{m}$  帯の大容量長距離光ファイバー通信が1987年に陸上幹線で商用化された後、1990年代に光ファイバーアンプの商用化により線形中継伝送が可能になって伝送距離が大幅に拡大した [1]。また Arrayed Wave Guide (AWG) フィルタの登場や光ファイバーアンプの広帯域化により波長多重伝送が可能になって容量が拡大した。かつて伝送距離・容量の制限要因は光ファイバーの伝送損や受信機の受光感度限界であったが、光アンプによる線形中継伝送方式以降は光ファイバーアンプによって増幅された信号光 - 自然放出光ビート雑音 [2] や、高パワーのWDM信号光がファイバー伝送路を伝搬する際に生じる四光波混合（入射光の近傍に新しい周波数の光が発生する現象）、相互位相変調（他の周波数光により位相が変化する現象）、自己位相変調（自身の周波数光により位相が変化する現象）などの非線形光学効果が主な制限要因となり、光子の存在確率のレート方程式（マスター方程式）による Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) 計算手法や、スプリットステップフーリエ法 (Split-Step Fourier Method: SSFM) による非線形光学効果の計算手法 [3] が提案され、伝送特性の評価ができるようになって伝送路システムの普及につながった。

WDM 伝送技術によりファイバー当たりの伝送容量を飛躍的に増大することができ、2003年には10 Gbit/s 光信号の80波多重 (800 Gbit/s) のWDMシステムが商用化された。WDM 伝送技術により大容量化された長距離光伝送システムは、主にテレコムキャリア（以下キャリア）が提供するレイヤ1ネットワークに活用されてきた。キャリアは、数千万以上のコンシューマに対して携帯電話・インターネットアクセス等の様々なサービスを安定して提供する必要がある、複雑なキャリアネットワークの最下位レイヤを支える光伝送システムには、極めて高い信頼性と堅牢性、並びにコンシューマの人口分布に応じて中長期的に拡張が可能なスケーラブルなアーキテクチャが必要とされた [4]。これに対し、Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM) 技術は、リングネットワークに波長パスの追加削除を可能とし、地域の需要に応じてスケーラブルに容量を拡大できるようになった。2004年よりキャリアはROADMの商用網での活用を開始し、二重に冗長化されたリング網を多段構成とすることで、スケーラブルでかつ堅牢性の高い全国網のバックボーンを構築してきた。図 1.1 は階層化リング網の例を示す。県内・県間をカバーする二段構成のリングにROADMとルーターが配置されており、県内リングは県内のROADM・ルーターを収容

し、Fiber To The Home (FTTH) やモバイル等のコンシューマー向けサービスを提供する。県間を跨ぐトラフィックは、県間リングを介して県外に転送される。両リングには Transceiver (TRx) からの WDM 信号が転送され、リングの右回りと左回りで二重化される。例えば 1:1 protection の場合、障害発生時には TRx からの信号が ROADM によって障害箇所と逆の経路に 50ms 以内に切り替えられる、といったように迂回ルートが明確で保守対応がしやすい [5]。このようなアーキテクチャを採用することで、スケーラブルに容量を拡大可能で、かつリングを用いたシンプルな冗長化によって堅牢なネットワーク運用を実現できる。

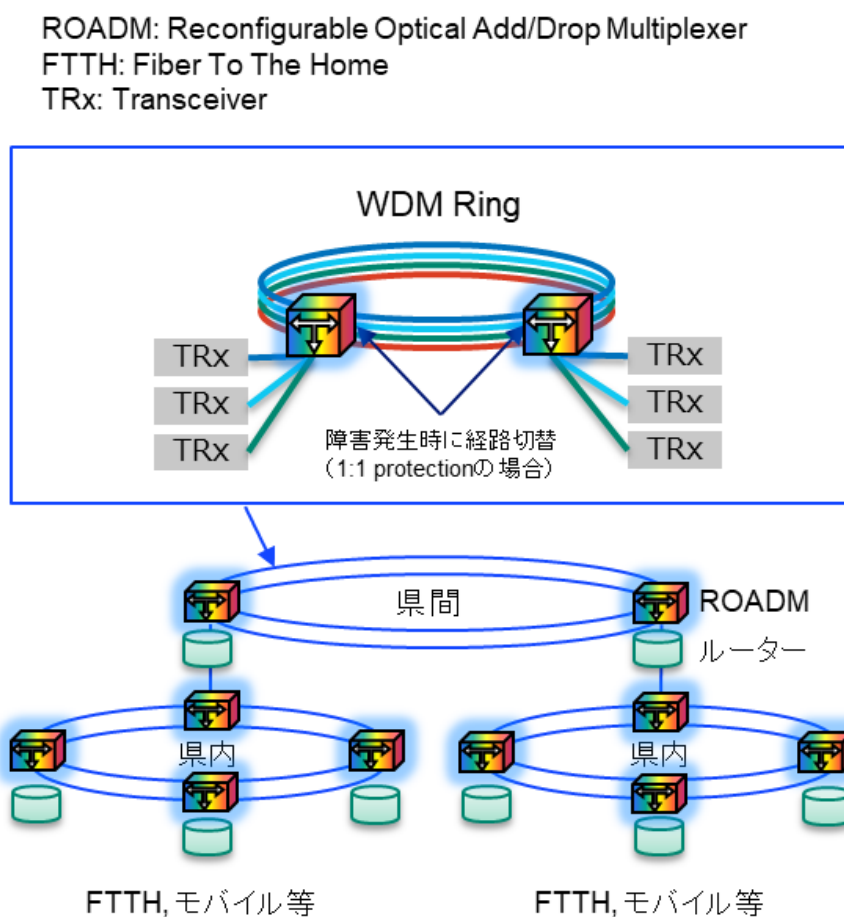


図 1.1 階層化リング網

### 1.1.2 デジタルコヒーレント技術の登場と伝送路設計の簡易化

しかし更なる大容量化に向けては、光ファイバーアンプの増幅帯域の制限から大幅に波長数を増やすことはできず、一波長あたりのビットレートを 40 Gbit/s や 100 Gbit/s へ高速化する技術への期待が高まった。図 1.2 は 10 Gbit/s の伝送技術を 40 Gbit/s や 100 Gbit/s に高速化する際の課題とその対応策を示す。10 Gbit/s 伝送に適用されていた強度変調方式は光強度の ON/OFF を光受信機で識別するが、信号を高速化すると (1) 時間軸方向にビット幅が狭くなり、雑音光の量が一定値のまま信号光の光強度だけが小さくなって OSNR が劣化する。また、信号を高速化すると (2) 変調スペクトルが光周波数軸方向に広がり、光フィルタ透過時に信号成分を喪失して波形が劣化する。信号

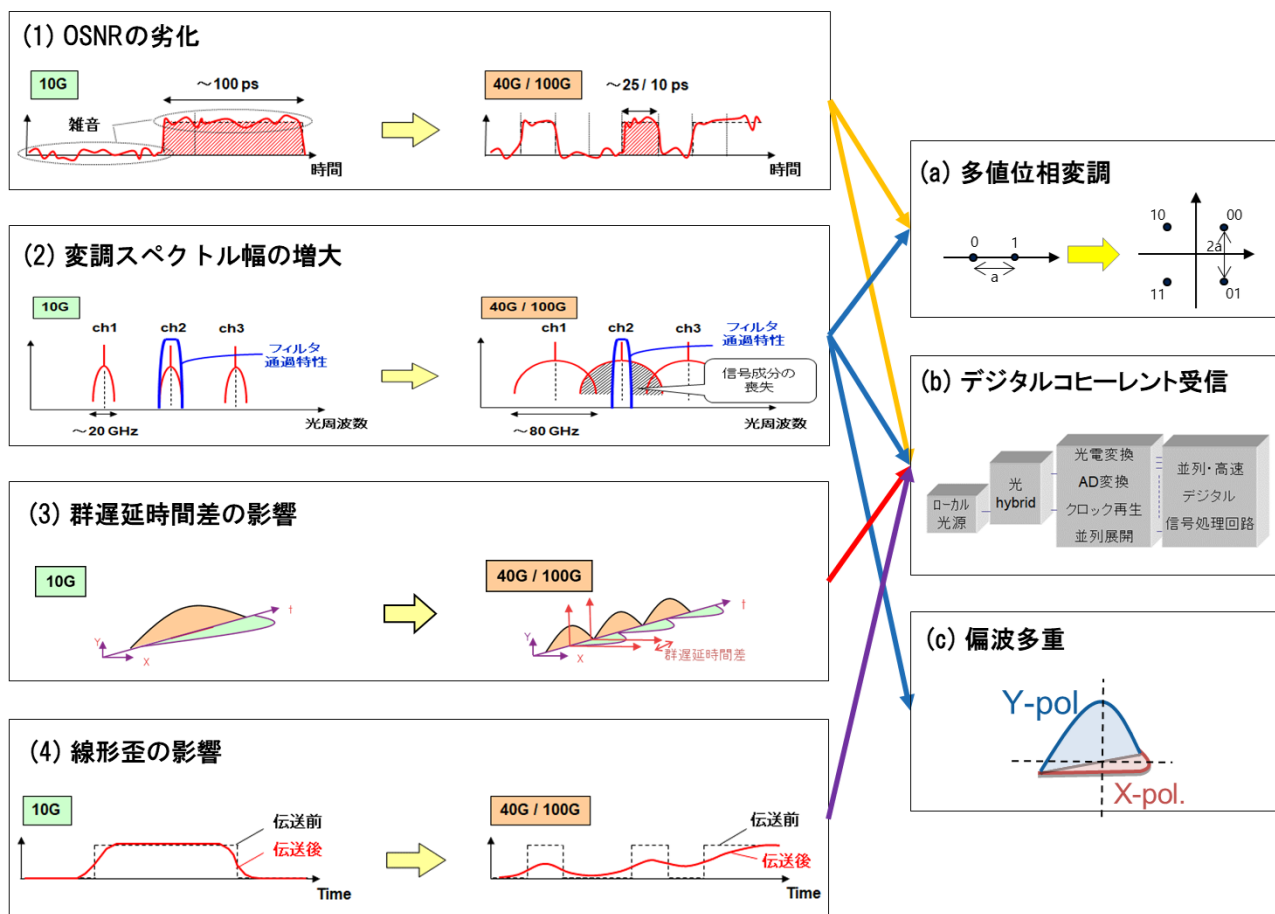


図 1.2 100 Gbit/s に高速化する際の課題とその対応策

の高速化の影響は他にも、(3) 内部応力等によって生じる偏波モード分散により、光ファイバー中を伝搬する 2 つの偏波モード間の遅延時間差の影響が大きくなる、(4) 光周波数によって屈折率が異なる波長分散という光ファイバー特性により、光パルスが伝搬した際に（各周波数間の位相関係のずれに起因して）生じる線形歪の影響がより深刻になる。これに対し、(a) 変調方式を 2 値の強度変調から 4 値の位相変調 (Quadrature Phase Shift Keying: QPSK) に多値化 ( $\times 2$ ) し、(b) 偏波 XY 成分を使って偏波多重 ( $\times 2$ ) する DP-QPSK 方式を採用することにより、ボーレート（搬送波に対する 1 秒間当たりの変調回数）を低く抑えたまま 100 Gbit/s への信号速度高速化 ( $\times 4$ ) を実現しつつ、信号光と局発光を干渉させて信号を検出するコヒーレント検波により高い受信感度を達成した [6, 7]。このような画期的な通信方式は、伝送路で発生する偏波回転や波形ひずみをデジタル信号処理回路により高精度・高速に補正するデジタルコヒーレント受信方式の適用によって可能となった。

デジタルコヒーレント技術の適用は伝送容量・距離拡大だけでなく、伝送路特性の適応補償技術によって伝送路を含むシステム構成の利点（シンプル化・低コスト化）をもたらすとともに、以下に示す、ガウシアンノイズモデルと閉形式計算方式を用いたシンプルで俊敏な伝送路の設計を可能にした（伝送路設計の利点）。

はじめに伝送システムにおける構成の利点について述べる。図 1.3 に 40 Gbit/s WDM 伝送システムと 100 Gbit/s デジタルコヒーレント伝送システム構成の比較を示す。a) の 40 Gbit/s WDM 伝送システムでは、波長分散による波

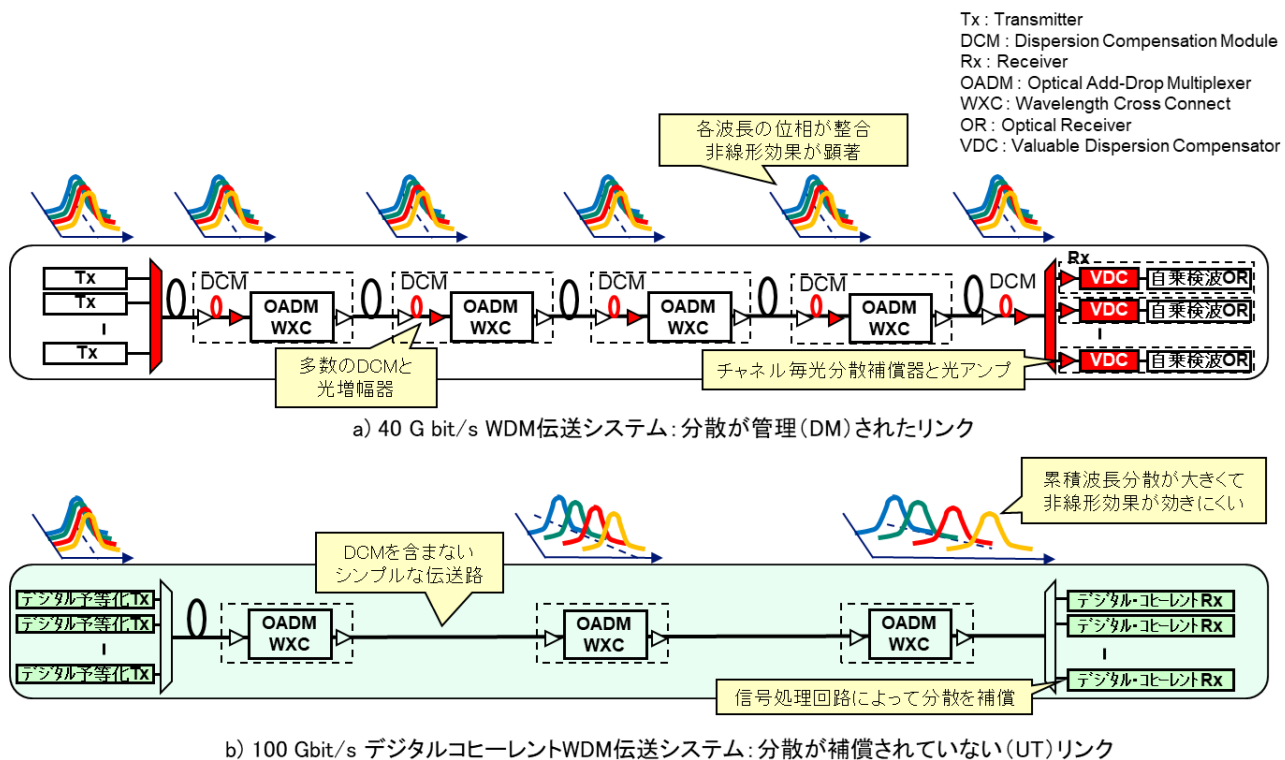


図 1.3 40 Gbit/s WDM 伝送システムと 100 Gbit/s デジタルコヒーレント WDM 伝送システムの比較

形歪を整形するために逆分散の特性を有する分散補償モジュール (Dispersion Compensation Module: DCM) を光中継器や光受信機に配置するとともに、伝送路最適化による性能向上のために、波長チャンネルごとに可変分散補償器 (Variable Dispersion Compensator: VDC) と光アンプが適用されていた。b) のデジタルコヒーレント WDM 伝送方式では、デジタル信号処理回路により最終段の Receiver (Rx) にてまとめて分散補償がなされるため、DCM や波長チャンネルごとの VDC と光アンプを含まないシンプルなシステム構成が可能となった。さらに、分散以外の伝送路特性や回路ばらつきに対しても適応補償が可能となり、生産性が向上してシステムのコストが下がった。本論文では前者を分散が管理 (Dispersion Management, DM) されたリンク、後者を分散が補償されていない (Uncompensated Transmission, UT) リンクと呼ぶ。

続いて伝送路設計の利点について述べる。WDM 伝送において、伝送距離は主に光ファイバーアンプによる自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission: ASE) による ASE 雑音と、信号光とファイバー媒体との非線形干渉 (Non-Linear Interference: NLI) による NLI 雑音 [3, 8] により制限される。図 1.4 の左下は ASE 雑音のイメージを示す。光ファイバーアンプに入力した信号光は光ファイバーアンプの利得  $G$  によって振幅が大きくなるとともに、光ファイバーアンプの自然放出光  $E_{SP}$  が付加され、信号光と自然放出光が干渉して雑音を生じる。右下は NLI 雑音のイメージを示す。光ファイバー媒体中を進行した信号光は非線形分極を引き起こして非線形光  $E_{NLI}$  を発生し、これが信号波形を歪ませて雑音となる。ここで  $\eta$  は非線形光学係数であり、光ファイバーは等方性媒質であるため  $E$  の三次の項となる。図 1.4 の上図はある条件下でこれらの制限要因をシミュレーションした結果を示す。縦軸は Signal to

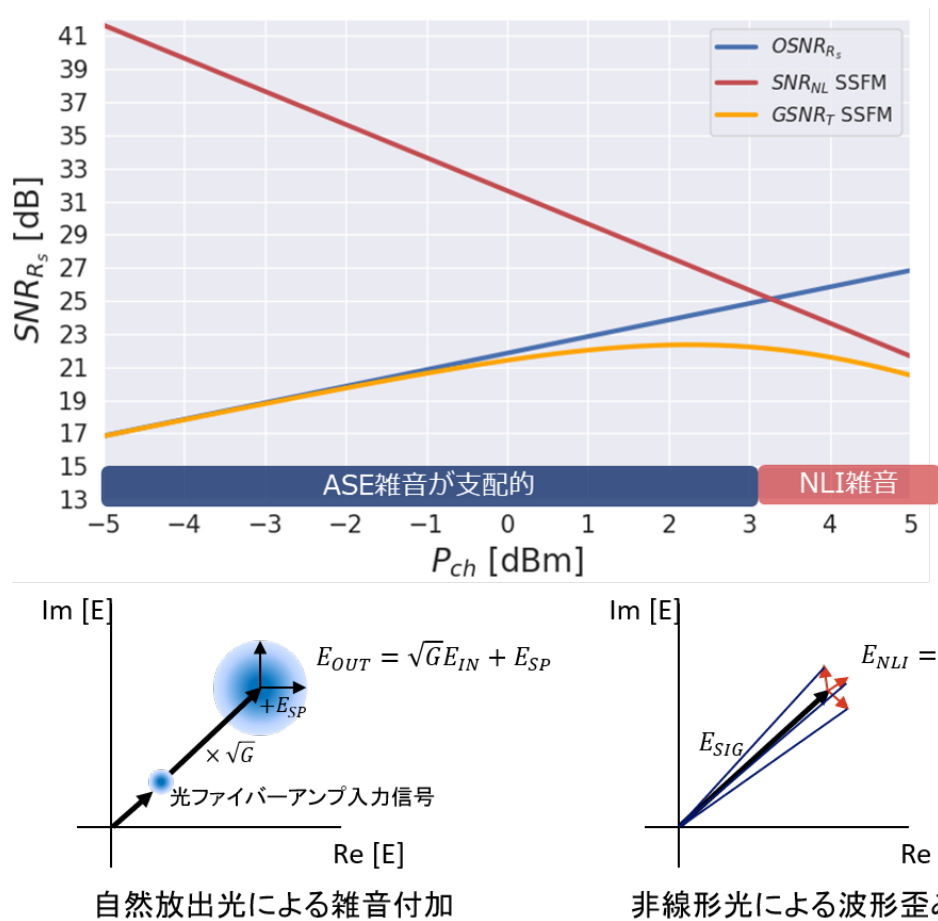


図 1.4 ASE 雑音とファイバー非線形効果による制限

Noise Ratio (SNR) を示し、横軸  $P_{ch}$  はチャンネル当たりのファイバー入力光信号パワーを示す。青線は ASE 雑音の計算結果を、赤線は NLI 雑音を SSFM を用いてを計算した結果を示しており、オレンジはその合計値を示す。図 1.4 のシミュレーションの条件下では入力パワーの最適値  $P_{ch}$  が 3 dBm 付近であり、これを境に  $P_{ch}$  が小さい領域では ASE 雑音の影響が、大きい領域では NLI 雑音の影響が支配的であることが分かる。オペレーターが光伝送路を設計する際、ASE 雑音・NLI 雑音の影響を鑑みて各スパンの光入力パワーを設計するが、NLI 雑音の影響が小さければよりファイバー入力パワーを大きくして伝送距離を延ばすことができる<sup>\*1</sup>。DM の場合、DCM によってスパンごとに波長分散による波形歪を整形して利得をのせ、図 1.3 の a) に示すように各波長が位相整合した状態で光ファイバーに入力されることから、非線形効果による波形歪が発生しやすい。ここで図 1.3 上には色分けされた WDM 信号のみが記載されているが、それぞれの波長が持つ周波数成分も DCM によって位相整合された状態で光ファイバーに入力されている点も追記しておく。また、非線形効果による波形歪の影響を計算するために非線形シュレーディンガー方程式を解く必要があり、計算コストと時間がかかるという欠点があった。一方 UT の場合、WDM 信号は最終受信端まで位相整合しないままファイバー中を伝搬するため、非線形効果による波形歪が起きにくい。この事象のモデル化

<sup>\*1</sup> A.D. Ellis らによる “Communication networks beyond the capacity crunch” の 3 章 「The optical fibre capacity crunch」には光ファイバーの通信容量を制限する 3 つの要因が挙げられており、これはそのうちの “increasing the injected power to obtain greater signal-to-noise ratio at the receiver” に相当する。

においては、2010 年頃より A. Carena, P. Poggiolini らの Politecnico di Torino のメンバによって UT における伝送品質劣化を推定する Gaussian Noise (GN) モデルが提案され [9, 10, 11]、長年にわたってモデルの妥当性が証明されてきた [12]。GN モデルは次の 3 つの仮定に基づく [11]。

- i. 非線形効果により発生するノイズは伝送信号と比べると十分小さく、信号光に対する摂動項として近似的に扱うことができる。
- ii. 送信信号は定常な正規分布として統計的に扱うことができる。
- iii. 非線形効果により発生するノイズはそれぞれが独立に加算できるガウス雑音（加法的ガウス雑音）として扱うことができる。

伝送品質を決定する光信号の  $SNR$  は、簡単のためアンプと非線形効果の雑音のみが存在するとすれば、GN モデルを使って

$$SNR = \frac{P_{ch}}{P_{ASE} + P_{NLI}} \quad (1.1)$$

と表現できる。ここで  $P_{ch}$  はチャネル当たりのファイバー入力光信号パワー、 $P_{ASE}$  は ASE 雑音パワー、 $P_{NLI}$  は非線形雑音パワーである。ASE 雑音はアンプへの入力パワー、飽和利得、雑音指数などから計算できる。ここで仮定 iii より、ASE 雑音、非線形雑音が無相関な加法的ガウス雑音となるため両者の影響がそれぞれの和として表現できる。非線形雑音の GN モデル近似は伝送距離が大きくなる（累積波長分散が大きくなる）ほど精度が良くなることが知られている。スパン間の相互作用を無視した、GN モデルの中で最も簡易な近似である incoherent GN モデル [11] は、オープンな伝送品質推定ツールである GNP<sub>y</sub>\*<sup>2</sup>に実装され、オープンソースソフトウェア（Open Source Software: OSS）として公開されている [13]。GNP<sub>y</sub> は Orange 等のキャリアや CESNET 等の System Integrator によって商用での活用・ブラッシュアップが進められ、近年では Open ROADM Multi-Source Agreement (MSA) においても、光送受信装置ベンダに依存しない、ニュートラルな伝送路設計ツールとして活用されるようになっていく。Politecnico di Torino や Microsoft 等は、2,000 km のフィールドファイバーと ROADM 装置、およびマルチベンダのデジタルコヒーレント送受信機を使って GNP<sub>y</sub> の精度を評価した結果、500 の実験サンプルの 90% 以上で OSNR と Generalized Signal-to-Noise Ratio (GSNR) の誤差が 1 dB 以内であったことを報告している [14]。

このようにして、デジタルコヒーレント以降は DCM を活用した分散設計や非線形シュレーディンガー方程式による厳密計算に代わり、GN モデルによる柔軟・迅速な光伝送路設計が主流となりつつある\*<sup>3</sup>。

---

\*<sup>2</sup> ツールの名称の GNP<sub>y</sub> は、Gaussian Noise と Python を合わせた造語。

\*<sup>3</sup> GN モデルの精度に関する議論及び最新動向については、付録 6.2 節に示す。

### 1.1.3 モニタ機能の高度化

前節では、デジタルコヒーレント技術がもたらした「伝送路設計の簡易化」という利点を紹介した。本節では、デジタルコヒーレント技術を活用した「モニタ機能の高度化」というもう一つの利点について説明する。

伝送路の設計を行うには伝送路システムのパラメーターが必要であり、運用時には伝送品質 (Quality of Transmission: QoT) のパラメーターが必要になる。ここで伝送路システムとは、ファイバー・アンプ・ROADM 等の伝送路の構成要素からなるシステムを指す。従来これらのパラメーターは、サービス提供前に専用装置を用いて測定し、End of Life (EOL) までの品質マージンを設定してサービス運用を行うのが一般的である。近年、伝送路システムや品質マージンに関するパラメーターをデジタルコヒーレントの受信機を活用してリアルタイムに QoT を推定する技術の研究が行われている。後述する DCX サービスに適用する場合、以下の 2 つのアプローチが候補となり得る。

#### ■1.1.3.1 BER を使った推定

ある決まった変調フォーマットとシンボルレートを持つ特性プローブ光をネットワークに通し、受信機にて前方誤り訂正 (Pre Forward Error Correction: Pre-FEC) によるビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) を計測し、これを使って End-to-End (E2E) の QoT 推定を行う [15, 16, 17]。

Pre-FEC BER は既に Centum gigabit Form factor Pluggable (CFP) MSA [18] や Common Management Interface Specification (CMIS) [19] 等の MSA においてパラメーターが定義されており、BER を使った推定はマルチベンダの TRx で利用可能である。その一方で、この方法ではネットワークの物理パラメーター情報が分からず、TRx のノイズ・アンプによる ASE 雑音・非線形雑音等の様々な劣化要因の総和量しか把握することができない点が短所となる。

#### ■1.1.3.2 Digital Longitudinal Monitoring (DLM)

距離・コンポーネントごとに、信号電力プロファイル・ファイバーの種類・各アンプのゲインスペクトルなどの伝送路の物理パラメーターを推定する [20, 21]。これらを GNPpy 等の光パス設計ツールに代入することによって QoT の推定が可能となる [22]。

DLM は、従来のハードウェア試験装置である (Optical Time Domain Reflectometer: OTDR) 等を使用せずに、受信 (Rx) 信号のみを処理することにより、ファイバー長手方向に分布する物理特性を推定する。例えば [20] では、ファイバー長手方向の Power Profile、光ファイバーアンプの利得スペクトル、光フィルタの周波数応答の推定に成功した結果が報告されている。ハードウェア試験とは異なり、DLM は「マルチスパン」測定が可能であるため、迅速かつコスト効率の高い伝送路システムモニタリングが可能となる。さらに、DLM は回線システム全体を可視化す

るため、ファイバー・アンプ・フィルタなどの伝送路部品に起因する障害の最適化および特定が可能である (4.6 節に後述)。

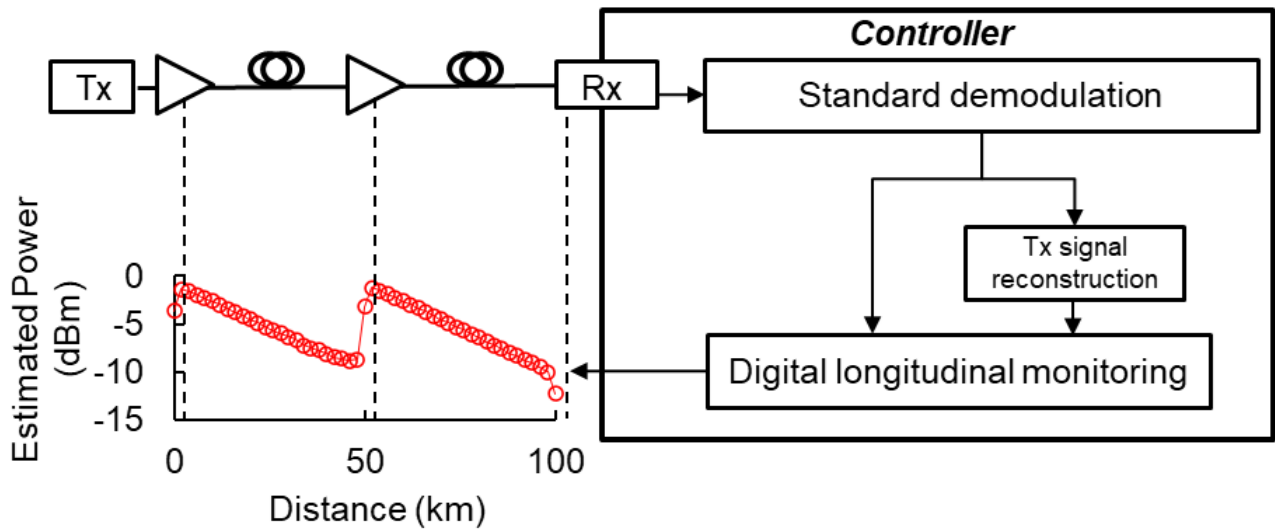


図 1.5 物理リンクパラメーター推定のための DLM

図 1.5 に DLM の一般的な構成を示す。Power Profile Estimation を可能にする鍵はファイバーの非線形性（自己位相変調）であり、Power Profile は距離ごとの非線形位相回転を推定することで得られる。送信機 (Tx) からの信号が伝送路システム上を伝播し、受信された信号データは制御部（コントローラー）に送られる。この時、DSP を介して得られた信号データを用いて距離ごとの非線形性が推定できる。リンクで発生するファイバー非線形効果の影響を推定するために、非線形性を除く波長分散などのインペアメントを補償する。続いて、復調された信号とシンボル決定（可能であれば復号とマッピング）とナイキストフィルタリングから回収された Tx 信号は、DLM アルゴリズムに入力される。距離ごとの非線形位相回転は、最小二乗法 [20] または相互相関 [23] を実行することで得られる。この方式では、システムを劣化させる主要因である ( $OSNR_{ASE}$ ,  $OSNR_{NLI}$ ) を計算でき、伝送路システムを含めた最適化ができることが最大の特徴である。また、Tx 信号は受信機またはコントローラーで復元できるため、信号データ以外に特別なトレーニングやパイロット信号は必要としないという長所がある。その一方で、DLM は比較的新しい技術であるためコヒーレント TRx の MSA に Inter face (IF) 定義がなされておらず、本論文執筆時点ではマルチベンダ環境で利用することが難しい。また、DLM はファイバーの非線形性を利用して上記特性を推定するため、DWDM で一般的に使用されているファイバー入力パワーでは、精度が低下するという課題が残されている [20, 23]。これら BER を使った推定と DLM のアプローチは、それぞれを単独で活用だけでなく、両方式を補完的に用いることで、QoT 推定精度や運用性を向上させることも可能である。

### 1.1.4 デジタルコヒーレント技術の発展と普及

2010 年頃よりデジタルコヒーレント光送受信装置の商用化が始まると、デジタル技術による光送受信装置の小型・省電力化が加速した。図 1.6 は 2010 年以降のデジタルコヒーレント伝送方式の進化と標準化活動の歴史を示す。図 1.6 の上部は省電力汎用版のコヒーレント Digital Signal Processing (DSP) LSI とその周辺回路を示して

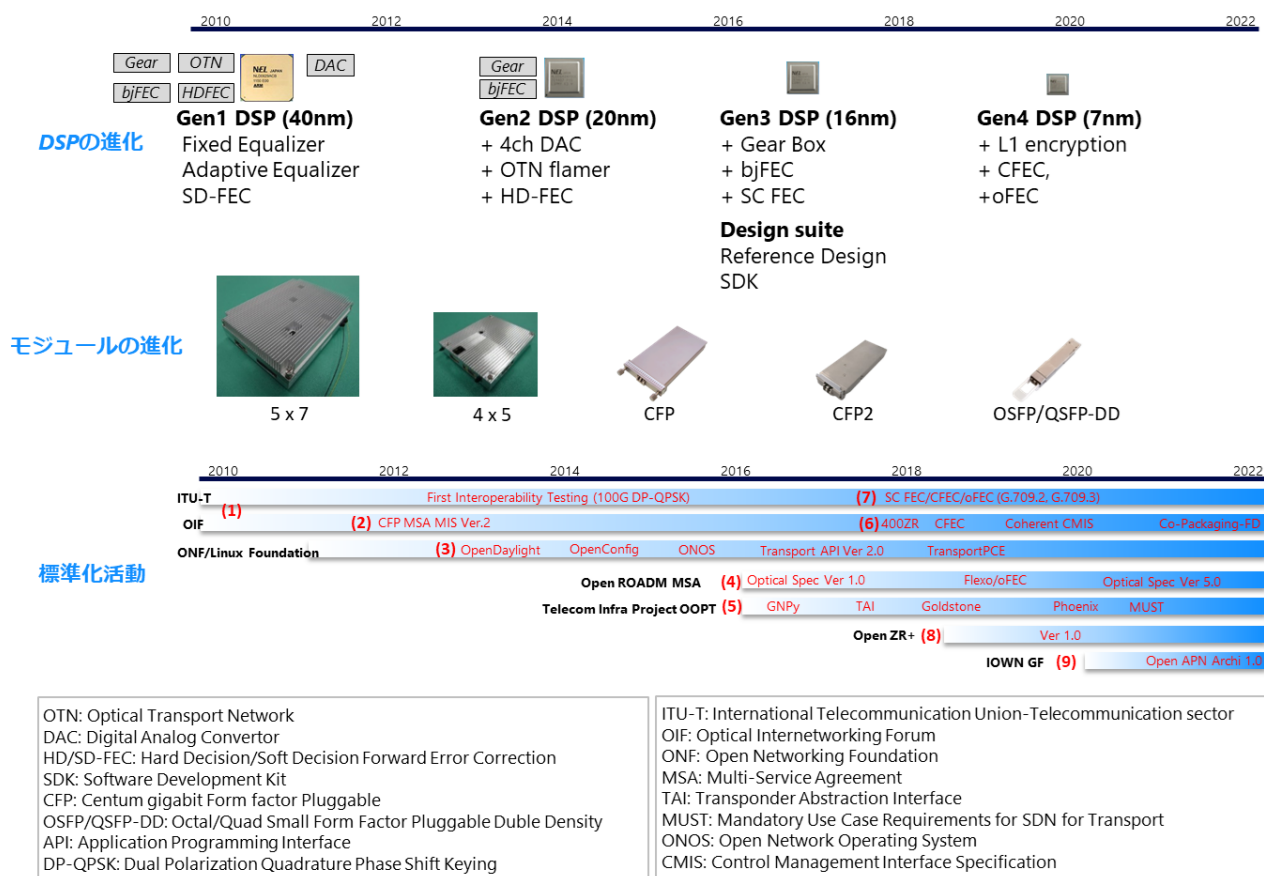


図 1.6 デジタルコヒーレント伝送方式の進化と標準化の歴史

おり、カッコ内は半導体プロセスを示す。コヒーレント DSP LSI が商用化され、世代が進むにつれて、半導体プロセスの微細化とデジタル信号処理技術の進展によって、高速化や省電力化だけでなく「+」で示した機能が DSP LSI 内部に新たに実装された [24]。Gen2 DSP では、デジタル信号をアナログに変換して LSI から出力する Digital Analog Converter (DAC)、Optical Transport Network (OTN) flamer、ビット誤りを訂正し伝送品質を改善する Hard Decision Forward Error Correction (HD-FEC) の各機能が搭載され、Gen3 DSP ではレイヤ 1 多重化機能の Gear box、CAUI4/OTL4.4 クライアント信号を直取するための bjFEC、ライン側の標準 FEC である Staircase FEC (SC FEC) の各機能が DSP に搭載された。また Gen3 DSP では、プロセッサやパケットスイッチ等の他の LSI と同様、DSP LSI が Reference Design と Software Development Kit (SDK) と合わせて提供されるようになり、より多くのベンダが短い開発期間で DSP を実装できるようになった。Gen4 DSP では、データセンタ (Data Center: DC) 事業者やクラウド事業者等の要望を受けて AES 256 の暗号化通信に対応する Layer 1 Encryption 機能や最新

の標準 FEC 方式を搭載し、さらに大容量の DC 間通信 (Data Center Interconnect: DCI) を省電力に実現するため、64 GBaud Dual-Polarization (DP) 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM) による 400 Gbit/s 通信も可能となった。図 1.6 の DSP LSI の中央部に、これらの DSP LSI によって実現されたモジュールの進化の様子を示した。埋め込み型の 100 Gbit/s 5 × 7 inch モジュールが 4 × 5 inch に小型化した後、その次の世代の CFP からはプラグブル・モジュールへと進化し、最新の Gen4 においては 400 Gbit/s に対応した QSFP-DD モジュールのデジタルコヒーレント技術実装も可能となっている。ここで、埋め込み型モジュール及び CFP までは ITU-T で標準化された OTN 装置に実装され、主にキャリアのバックボーンネットワークに活用されるケースが多かったが、QSFP-DD は後述するように DC・クラウド事業者が中心となり、DCI 向けからデファクト化が進められた。

図 1.6 下部の標準化活動の状況を説明するにあたり、まず各団体が定義しているインターフェース仕様や開発してい

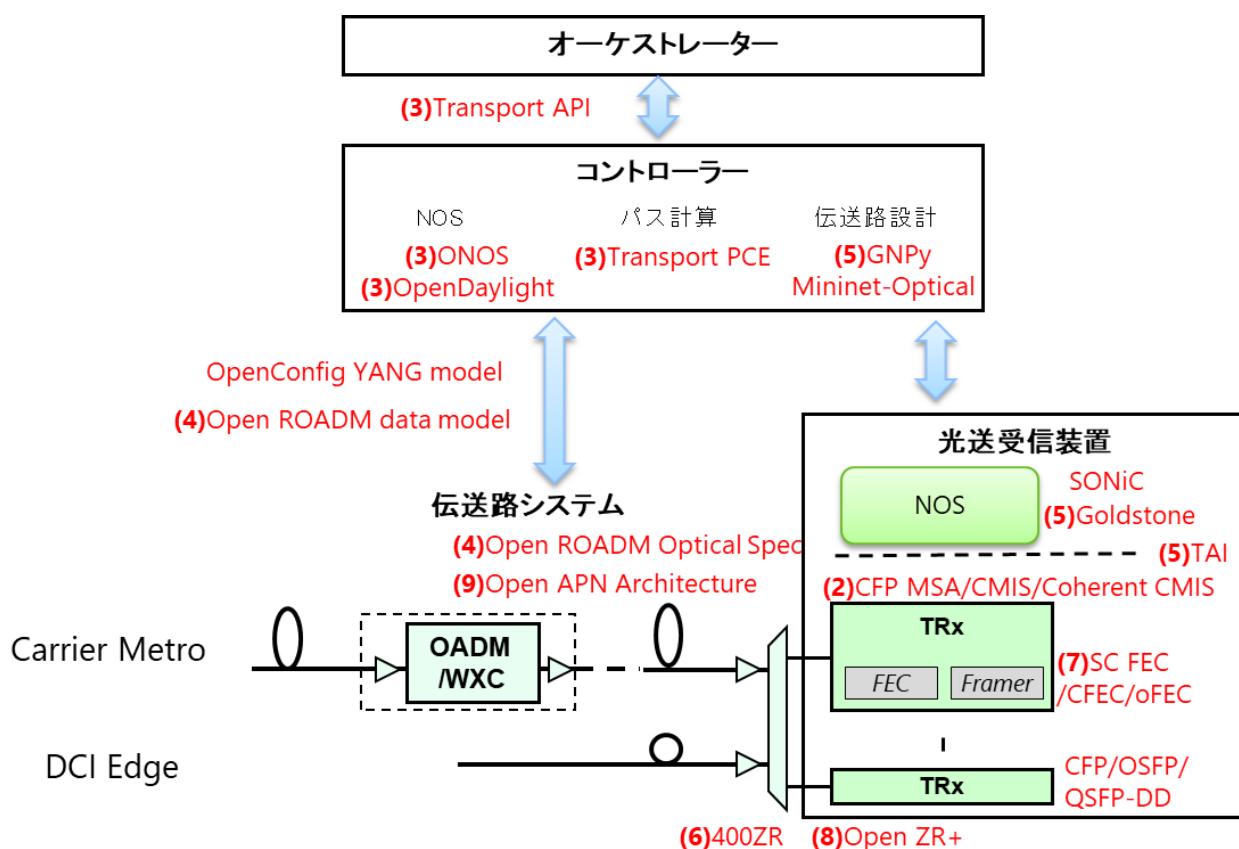


図 1.7 各団体のインターフェース仕様やツール群

るツール群が、伝送路システム・光送受信装置・コントローラーのどの部分に関するものかを図 1.7 にマップにして説明する。図 1.7 の下部にはファイバー・アンプ・ROADM 等の伝送路の構成要素からなる伝送路システムと、装置の Network Operating System (NOS) や TRx からなる光送受信装置があり、上部にはこれを制御するコントローラーとオーケストレーターが配置されている。コントローラーは ONOS や OpenDaylight 等の NOS が OSS として開発されており、この中の機能としてパス計算の Transport PCE や伝送路設計ツールの GNPpy・Mininet-optical 等がある。オーケストレーター・コントローラー・伝送路システム・光送受信装置間には、各団体によって Transport

API・OpenConfig YANG model・Open ROADM data model 等のインタフェースやモデルが定義されている。

図 1.6 下部に戻り、歴史順に解説する。デジタルコヒーレント伝送方式は、2010 年当初は主にキャリアとそれらに装置を供給するベンダが中心となって、図中 (1) の International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) や Optical Internetworking Forum (OIF) などの団体で標準化が進められていた。その後、(2) デジタルコヒーレント技術を搭載した CFP の Management Interface Specification [18] が CFP MSA で定義されると、(3) OpenConfig や ONF によって、コントローラーにおける Software Defined Network (SDN) を光伝送領域にまで拡大して光送受信装置を制御するためのオープンな NOS・設定用 YANG model や Transport API が定義・公開されるようになった<sup>\*4</sup>。(4) 2016 年、ROADM システムをマルチベンダ化するための API や仕様を定義する Open ROADM [25]、(5) 光と IP ネットワーキングにおいてオープンな技術・アーキテクチャ・インタフェースの定義を目的とした Telecom Infra Project Open Optical & Packet Transport (TIP OOPT) が発足すると、キャリアやハイパースケーラーの参画により、光伝送技術のオープン化が加速した [26]。前者は主に伝送路システム部分、後者は主に光送受信装置部分に力点を置いている。

Open ROADM は主に AT & T・Orange・DT 等のキャリアと、それらに装置を供給するベンダから構成された MSA であり、発足してすぐに装置・ネットワークアーキテクチャと構成要素それぞれのパラメーター・スペックを Optical Specification Ver 1.03 にまとめて MSA サイト上で公開した (2025 年 2 月現在は Ver 7.0)。また、データプレーンの相互接続に欠かせない光送受信装置内の FEC 仕様・FlexO フレーム構造・シンボルマッピング等を詳細に定義してドキュメント化し、同じく MSA サイト上で公開している。

TIP OOPT には、Telefonica・Vodafone 等のキャリアと、それらに装置を供給するベンダ (Whitebox ベンダ含む)、Politecnico di Torino 等のアカデミアが参加している。光と IP ネットワークにおけるハードウェア・ソフトウェア分離とイノベーション加速を目指す TIP OOPT は、前章で述べた GNP<sub>y</sub> の開発やオープンな光送受信装置の仕様策定を実施する等の活動を推進している。

(6) 2017 年頃に CFP2-DCO が普及し始めると、2018 年には Google や Microsoft 等のハイパースケーラーが中心となり、大容量の DCI を省電力で実現するため、OIF にてキャリア向けの CFP2 よりもさらに小さく、ルーターやスイッチに搭載可能な QSFP-DD 等の小型のフォームファクターに対応可能な 400ZR の議論が活発化した。この規格は、ターゲットを DCI に絞り、< 120 km の DCI 向けでかつ 400G DP-16QAM のみに対応している。(7) OIF・Open ROADM 等の多くの団体によってデジタルコヒーレント伝送方式のデータプレーンのデファクト標準仕様が制定されていく中、ITU-T にて FEC のデジュール標準仕様策定がはじまり、デファクト標準であった SC FEC・CFEC・oFEC が選定された。(8) OIF での 400ZR 制定に続き、QSFP-DD 等の小型のフォームファクターで 100～400 Gbit/s の多種モードに対応する OpenZR+ MSA のデファクト標準仕様策定が始まった。OpenZR+ MSA は

<sup>\*4</sup> 図 1.6 下部に記載した以外にも、Internet Engineering Task Force Abstraction and Control of TE Networks や Cablelabs P2P、Institute of Electrical and Electronics Engineers 等でもデジタルコヒーレント伝送方式に関連する標準化が推進されている。

400ZR のアプリケーションを拡張し、イーサネットトラフィック・DCI・ローカルエリアおよび長距離通信に対して、運用効率の高いソリューションを提供することを目指している。

(9) 2020 年には IOWN Global Forum が発足し、ネットワーク分野とそれ以外の業界によって、金融業界向けのインフラや放送事業向けのリモート・メディア・プロダクション等のユースケースが議論され、ドキュメント化されている。さまざまな拠点間を光波長パスでダイレクトに接続することを可能とする Open All-Photonic Network (APN) の Functional Architecture は重要な位置を占めており、光電融合や波長変換などの次世代の光伝送技術を見据えた新しいネットワークアーキテクチャの文書がリリースされ（2025 年 2 月現在は Ver 2.0）、コンセプト実証が進められている。また、Open ROADM・TIP OOPT・IOWN Global Forum の 3 団体はそれぞれのターゲットを目指す中で独自の強みを示しつつ、一方でいずれの団体も Multi-vendor, Disaggregation, Open Interface, SDN Architecture を推進する点で共通しており、近年では団体間でリエゾン関係を締結してオープン化を加速する動きが出てきている [27]。

従来光送受信装置はキャリアの専用装置という色合いが強かったが、以上のように、デジタル技術の普及によって光送受信装置の小型・省電力化が進み、DC やクラウド等の多種多様な事業者が光送受信装置を活用するようになったこと、デジタル化に伴って制御インタフェースの制定・オープン化が進み、よりコントローラーが Software Defined に制御しやすく、様々な業種が参加してオープンイノベーションを加速しやすい環境が整ってきている。

#### 1.1.5 データセンタ内で起きた技術革新：仮想化技術（ハードウェア・ソフトウェア分離）

これまで、長距離光伝送においてデジタルコヒーレント伝送技術が果たしてきた技術革新を受けて、利用者の裾野が広がり様々な業種が制御インタフェースの制定・オープン化に参加していることについて述べてきた。この節では、DC の中で起きた技術革新について述べる。SNS やビデオストリーミング・ビデオ会議サービス等の普及によって急激に増加したコンピューティング需要とそれに伴うトラフィックを処理するため、ハイパースケール DC 内ではハードウェアとソフトウェアを分離するためのオープンで新しい技術の実装が進んだ。代表的な例として、物理サーバーにハイパーバイザーと呼ばれる仮想化ソフトウェアを用いて仮想サーバーを動作させ、1 台のサーバーハードウェアを複数台の仮想的なサーバーに分割して利用する「サーバー仮想化」や、複数のストレージを仮想的に統合して 1 つの大きなストレージプールを構成する「ストレージ仮想化」等が挙げられる。これらのハードウェアとソフトウェアを分離する技術は、製品コストを下げることで DC オペレーターの Capital Expenditure (CAPEX) 削減を可能にするだけではない。DC オペレーターにとって、Kubernetes・Docker・Ansible 等のサーバー系で実績のある OSS の活用を可能とし、短期間にシステムを構築できる（迅速性・俊敏性）、高信頼かつ柔軟にシステムを拡張できる（柔軟性、冗長性）ことで DC オペレーターは運用を自動化でき、Operating Expense (OPEX) を削減できることの方が、仮想化技術導入の主要な目的となっている [28]。

2007 年頃から、主にコンピューティング分野の研究者が柔軟性の高いネットワークを実現するために、ハード

ウェアとソフトウェアを分離した新しいタイプのルーターやスイッチを提案し、コミュニティ活動によりソフトウェア部分をオープンイノベーションで開発する潮流が高まり、様々な業種が参加して実装が始まった [29]。2011 年には、ネットワーク機器を 1 つの制御装置で集中管理して複雑な転送制御を行ったり、柔軟にネットワーク構成を変更可能とする技術である OpenFlow を開発することを目指して Open Networking Foundation (ONF) が発足した [30]。その後、高効率を実現する DC ファシリティの要素（サーバー・空調・電力等）のシステム仕様を検証し、そのナレッジをオープン化する Open Compute Project (OCP) [31] が設立され、Meta・Microsoft 等のハイパースケーラーやホワイトボックスベンダ等が参加したオープンイノベーションで市場が拡大している\*5。図 1.8 は Microsoft によるネットワーク仮想化の取り組みを示す。Microsoft はハードウェアからソフトウェアを分離するために、Broadcom 等各社 Switch ASIC の共通インタフェースである Switch Abstraction Interface (SAI) [34] を定義し、続いて様々なネットワークアプリケーションや管理ツールを利用するため、DC 向けのオープンな Switch 用の Network Operating System である”SONiC” [35] の開発を推進した。Microsoft のサイトでは、数百の DC を運用

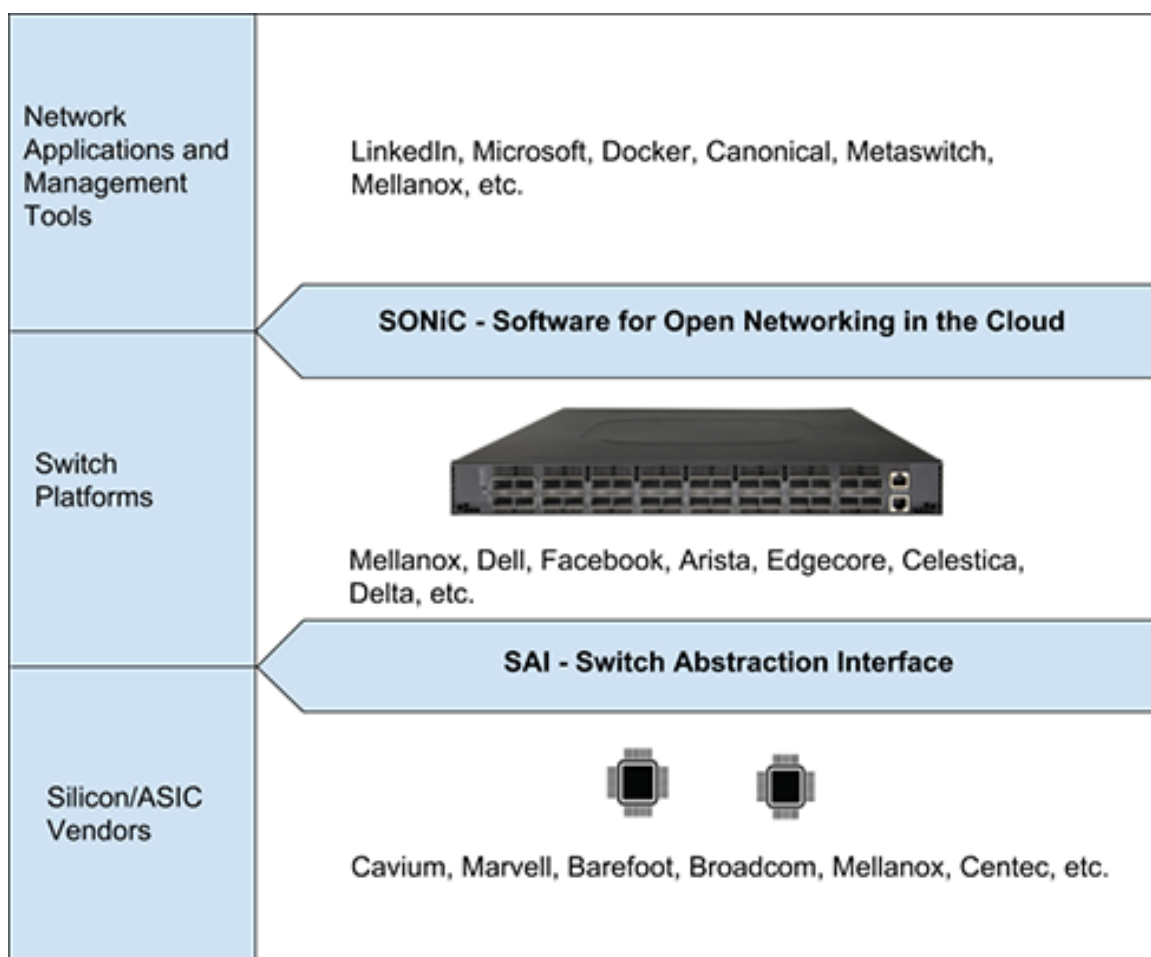


図 1.8 Microsoft によるネットワーク仮想化（出典：<https://www.volansys.com/blog/switch-abstraction-interface-breaking-the-network-aggregation/>）

し数万のスイッチを使用する場合の要件として、

\*5 米国に閉じず、日本や韓国などアジアでもオープン仕様の導入が進んでいる [32, 33]。

- ネットワークの各レイヤで最高レベルのスイッチハードウェアを適用できること
- エンドユーザーに影響を与えることなく新機能を実装できること
- プログラム更新は、安全性と信頼性を確保しながら、数週間ではなく数時間で完了させること
- クラウドスケールで詳細なテレメトリを行い、完全に自動化された障害対策を活用すること
- SDN をベースにソフトウェアを有効活用し、ネットワーク内のすべてのハードウェア要素を共通のアーキテクチャで容易に制御できるようにすることで、重複を排除し、障害を減らすこと

とし、SAI・SOCNiC オープン化の経緯とともに、サーバーで確立されたコンテナ技術をモノリシックなスイッチソフトウェアに適用している点を紹介している [36]。

このような OSS・オープン仕様を活用したオープンイノベーションの活動を通して Whitebox 市場が形成され、Linux ベースのプラットフォーム上で OSS が進化し、ゼロタッチ・プロビジョニングやストリーミング・テレメトリなどの運用自動化ツールが DC で使用されるようになり、DC 事業者は新しいオペレーションを導入して少ないエンジニアで膨大な数の装置を管理・制御し、運用コストを削減できるようになった。こうして、特定のベンダの製品に限定されない水平分業型にセグメンテーションされた DC 機器のビジネスモデルと、オペレーター主導による柔軟・高効率な DC インフラが構築されていった。

#### 1.1.6 取り巻く環境の変化：データセンタ間通信の拡大と広域化

前節では、DC において、急激に増加したコンピューティング需要とそれに伴うトラフィックを制御するための技術革新と、ONF や OCP で行われてきたオープンイノベーションの取り組み・運用自動化の現状について紹介した。この節では、クラウド、Artificial Intelligence (AI)、Machine Learning (ML)、ビッグデータ、アナリティクス、Augmented Reality (AR) や Virtual Reality (VR) 技術の急速な普及により、近年急速に需要が拡大している DCI について、その背景と状況を紹介する。

2015 年頃まで、広大な敷地と莫大な電力を必要とする DC は、ハイパースケール DC と呼ばれる巨大な DC を都市部から離れた郊外に建設するのが一般的であったが、Microsoft や Amazon Web Service (AWS) 等のクラウドサービス事業者は、ビデオ会議などの遅延要請の厳しいリアルタイムアプリケーションをサポートし、かつ大規模停電や自然災害などによる多重障害を回避するために DC の分散配置を推進している\*6。図 1.9 は Microsoft の DC アーキテクチャの変遷を示す。(a) 従来は mega-DC 内に建設された複数の大規模な DC ビルを、A~D の 4 つの Core Network Rooms (CNR) で光ファイバー接続していたが、(b) 近年では Region 内に 2 つの Regional Network Gateway (RNG) を設けて Region 内の複数のサイトをダークファイバーによって冗長接続している（以下 Regional DCI 網）。往復遅延はアプリケーションの要求により 2 ms 程度に制限されるため、各 DC と RNG 間は数十キロ程

\*6 この傾向は Microsoft・AWS・Google 等のクラウドサービスオペレーターには該当するが、Meta の様にコンシューマビジネスを展開する事業者は現在でも郊外にハイパースケール DC を構築するケースが多い。

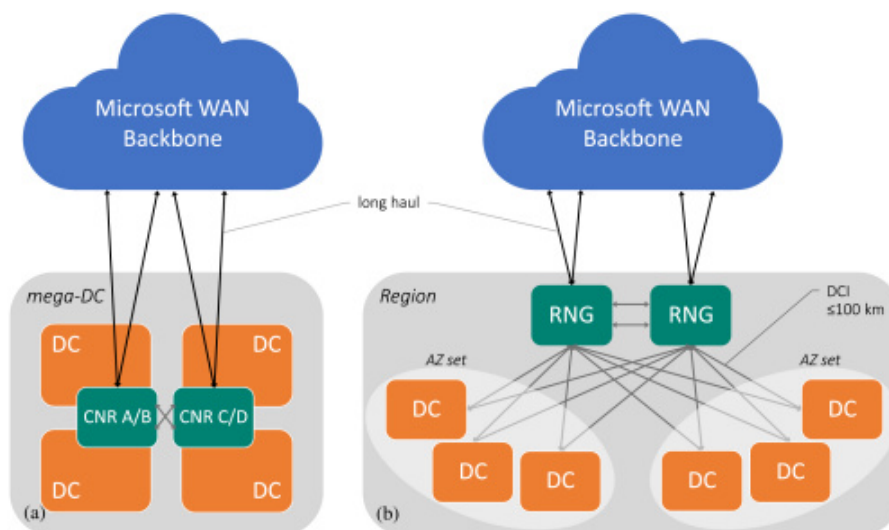


図 1.9 Microsoft の DC アーキテクチャの変遷（出典：<https://doi.org/10.1364/JOCN.11.000C94>）

度のファイバーで接続されている [37]。AWS の場合も Regional DCI 網と似通った DCI アーキテクチャを採用しており、冗長化された電力源・ネットワーク・接続機能を備えている複数の DC からなる Availability Zone (AZ) が定義され、AZ 間は冗長化された専用メトロファイバー（100 km 以内）で相互接続されている [38]。AZ 間の遅延は 2 ms 以内に規定されており、DWDM リンクが適用されてピーク時には 25 Tbit/s のトラフィックを収容する [39]。

DWDM リンクのトラフィックが 1 Tbit/s 以内の中小規模の DCI の場合には、図 1.10 のような構成（ここでは

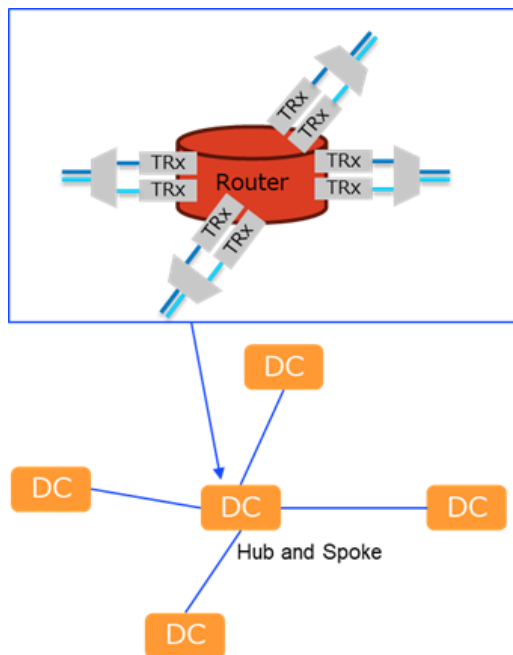


図 1.10 Routed Hub and Spoke 構成の DCI

Routed Hub and Spoke と呼ぶ）が普及している。初期導入コストとラックスペースを削減するため、光送受信装置を削減しルーターにコヒーレントトランシーバーを刺した IP over DWDM 構成を用い、メイン拠点の DC を中心に Hub and spoke トポロジーで接続する。この構成は小規模の場合にコストが最小で済むこと、L1 ネットワークを

L2/L3 装置にマージすることで L2/L3 運用者にとって直感的で分かりやすい等の理由から、中小規模の DC 事業者やインターネットサービスプロバイダーに広く普及し、昨今導入が進んでいる。しかしながら、この構成では中央のハブの部分にトラフィックが集中するため、拠点数や通信容量が増加すると中央のルーターの回路規模・電力が急増し<sup>\*7</sup>、スケーラブルに規模を拡張することが難しい。また中央のハブ部分のルーターに障害が発生すると全ての拠点の通信に影響が及ぶなど、信頼性にも難点がある。信頼性を向上させるために中央のハブを二重化・二拠点化してリスク分散する手法も考えられるが、そのためには 2 倍の装置・ファイバーリンクが必要になる。

以上のように、ハイパースケーラーや DC オペレーターによって DCI の需要が拡大しており、OMDIA 等の調査会社のレポートによると 2023 年には全 WDM 需要の約 40% を占め、年平均成長率 (Compound Annual Growth Rate: CAGR) は 13~14% と見積もられている。また [40] によると、DC 間接続の通信量は 2013 年から 2023 年の 10 年間の間に 27 Exabyte (EB) から 166 EB と約 6 倍に増え、2033 年には 962 EB に至ると予測されている。図 1.10 の構成はダークファイバーを用いて運用されているケースが多いが、ファイバー当たりの波長数が少ないためダークファイバーまたは伝送路システムの利用効率が悪い点も課題であり、将来の通信容量拡大を見据えたサステナブルな解決策が必要となる。このような DCI 需要の高まりを受け、米国ではダイナミックな光スイッチングによりオンデマンドに通信ネットワークキャパシティの提供を行う ExaSwitch [41] や、24 時間以内に固定帯域の接続サービス Waves on Demand を提供する Zayo [42] 等が、日本では WDM 技術を適用した DCI サービスを提供するビー・ビー・バックボーン [43] 等が、DC 間接続のニーズを受けて新規サービスを開拓している。DCI 以外の WDM 需要の CAGR は約 2 % であることを考慮すると、今後の大容量通信は DCI が牽引する形となり、最新技術も DCI を皮切りに適用される可能性が高いと推測できる。

さらに、近年では地域の電力供給限界や立地不足により DC の分散化が進むケースが増えている。DC は 1 つの施設が数十メガワットを消費することが一般的であり、これは数万世帯分の電力消費に相当する。大容量海底ケーブルを利用しやすく欧州 DC の一大集積地になっているアイルランドでは、DC 事業者による首都ダブリンでの新規プロジェクトの許可申請が地元当局によって却下されるなど、電力供給問題により新規の DC 建設が難しくなっている [44]。日本でも、資源エネルギー庁の報告 [45] によると、DC の 8 割強が東京・大阪エリアに集中しており、特に東京エリアにおいては運転開始から 40 年以上経過している老朽火力が供給力の約 1 割を占めており、かつ多くの火力発電所が東京湾岸に集中するなど、電力供給問題が顕在化している。このような要因からも、DC 及びそれを繋ぐネットワークの広域化が世界の大都市で加速していくと考えられる。

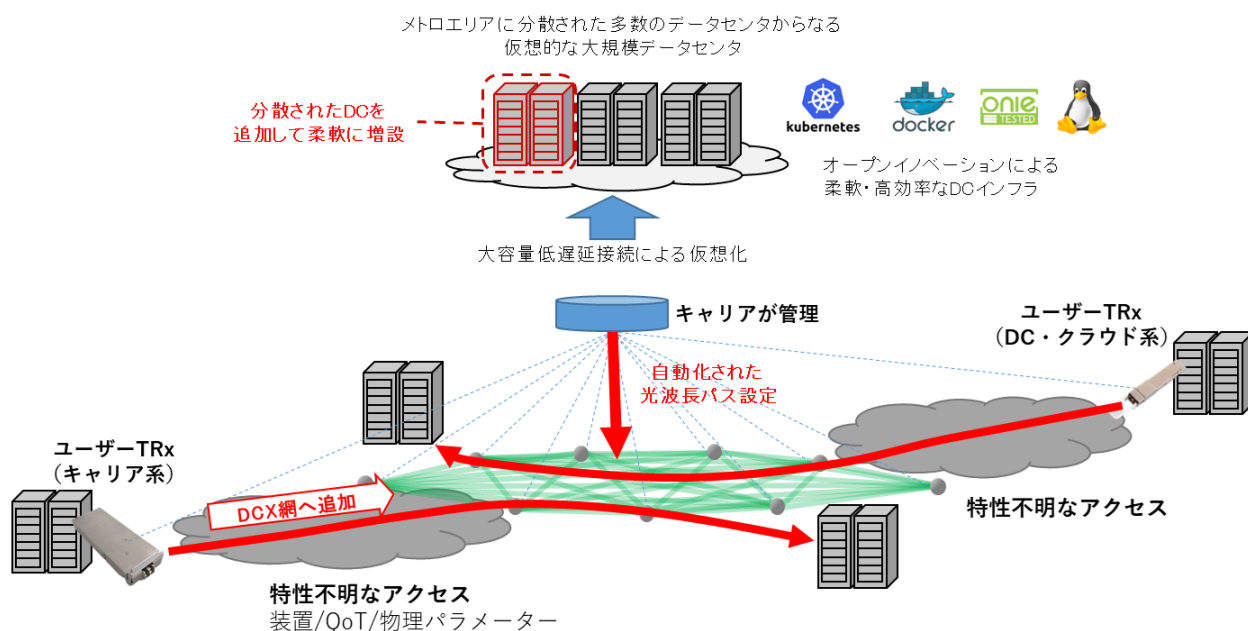
もう一点、データセキュリティ・個人情報保護の観点からも、DC 間接続のニーズが拡大している事例を紹介する。近年、ハッキング・フィッシング・ランサムウェア攻撃等のサイバー犯罪の増加、EU の一般データ保護規則 (General Data Protection Regulation: GDPR) や日本の個人情報保護法等の法規制の強化により、データセキュリティ・個

---

<sup>\*7</sup> 例えばクロスバー型スイッチング回路では、ポート数が  $N$  の場合、必要なスイッチエレメントの数は  $N^2$  に比例する。

個人情報保護の重要性はかつてないほどに高まっている。また、AI、IoT、ビッグデータといった新しい技術の登場により、データの収集・分析・利用がより高度になる一方で、それに伴いリスクも複雑化した。このような背景のもと、国・自治体や企業は大切なデータはクラウドではなく自身が管理するローカルストレージに保有し単一の国・地域内でのみ提供するなどして、他の国・地域の法令の影響を排除しデータ主権を担保する事例（以下ソブリンクラウドと呼ぶ）が近年増加している。

### 1.1.7 データセンタエクステンションサービスへの期待



#### 光伝送技術の進化

光伝送へのデジタル技術適用により、

- ・ 柔軟・俊敏な光伝送路設計が可能に
  - DCM不要のシンプルなシステム構成
  - 閉形式GNモデルによる計算時間の大幅削減
- ・ 小型・省電力化により様々な業種に普及

**キャリア・DC・クラウドが協力し、制御IFの制定・オープン化が進展**

#### 仮想化技術(ハード・ソフト分離)の進化

DC内では、

- ・ インフラの効率化が進展
- ・ OSSによる自動運用が普及
  - ハード仕様・制御IFのオープン化推進
  - ソフトPFで効率的に制御・管理する基盤の整備

**オープンイノベーションで市場が拡大、技術が成熟**

#### 取り巻く環境の変化

- ・ AIやクラウドサービスを低遅延で提供するため、ユーザ近くのDC需要が増加
- ・ データセキュリティやプライバシーを高めるため、データを地理的に指定された地域に配置
- ・ 地域の電力供給限界や立地不足により、DC及びそれを繋ぐNWの広域化が加速

図 1.11 DCX サービスのビジョンとその背景 [46]

図 1.11 下部はここまでの節で示した本研究の背景を示す。光伝送技術はデジタル技術の適用後に様々な業種に普及し、キャリア・DC・クラウド事業者が協力して制御 IF の制定・オープン化が進展している。DC 内の仮想化技術(ハード・ソフト分離)は OSS・オープン仕様を活用したオープンイノベーションによって自動運用が進み、柔軟・高効率なインフラが構築されている。光伝送・仮想化の二つの技術革新と、1.1.6 節に示した環境の変化を背景として、図 1.11 上部のように、メトロエリアに分散された多数の DC からなる仮想的な大規模 DC を実現するデータセンタエクステンション (DCX) サービスへの期待が高まっている。DCX サービスは、図 1.11 の中央部に示すように面

的に展開した多対多の DC 拠点間において、光波長パスを用いてキャリア・DC・クラウド等多種多様なユーザーの TRx 間（例：キャリアに普及している CFP と DC・クラウドに普及している QSFP-DD 等）を需要に応じてオンデマンドに接続する。キャリア・DC・クラウド等の事業者は、メトロエリアに分散された DC を仮想的に一つの大規模 DC として活用できる。さらに、各事業者はこれまで個別にクローズドな DCI を構築・運用していたが、WDM 技術により高密度に多重された伝送路システムをキャリアサービスとして提供することで、多種多様なユーザー間で伝送路システムをシェアしてインフラの効率を大幅に向上させ、かつユーザーの要求に応じてスケラブルに増設が可能となる。例えば IOWN Global Forum では、「クラウドサービスインフラのスケールアウト」を目指し、新設の DC を追加する際に APN を使って「高速・低遅延・遅延確定的な L1（トランスポートリンク）で拠点間を臨機応変に接続するネットワーク」 [47] を実現しようとしている。文献 [47] では、具体的に以下のようなユースケースを用いて DCX のメリットを紹介している。

**ハイブリッドクラウド・マルチクラウド** ユーザー DC と、広域に展開した複数のクラウドがある DC を、DCX によって高速低遅延に接続。ユーザーは業務アプリ・Web アプリ・AI アプリなどを活用する際、クラウドサービスを使い分けたり、時間課金などのオンデマンドの接続も可能となる。

**エッジコンピューティング** ユーザー DC と、広域に展開した複数のキャリアの Multi-access Edge Computing (MEC) がある DC を、DCX によって高速低遅延に接続。ここで MEC DC は、ユーザーにとって膨大な数の端末からのデータを集約、整流するポイントとなる。

**クラウドサービスインフラのアジャイルな拡張** クラウドサービス事業者は、広域に展開した多数の DC 間を高速低遅延にメッシュトポロジーで接続したいが、新規 DC 追加の際に既存 DC 間とダークファイバー接続するのに膨大な時間とコストがかかっている。DCX を適用することで、クラウドサービス事業者は新規 DC 追加の際に DCX に波長を追加するだけでネットワークを構築できる。

#### 1.1.8 DCX のアーキテクチャとそのサービス要件

前節に示した新しいユースケースを実現するには、キャリア・DC・クラウド事業者等の様々な業種が参加したオープンイノベーションを加速する必要がある。さらに、AI 技術の普及によって発生する莫大なコンピューティングリソースと DC 間のトラフィックを収容していくため、DCX のように柔軟・高効率な将来のインフラアーキテクチャを構築することは、スケラビリティ・サステナビリティの観点から喫緊の課題であると言える。この節ではまず、既存の代表的な大容量光ネットワークである階層化リング（1.1.1 節）や Regional DCI・Routeed Hub and Spoke（1.1.6 節）と DCX を比較してその長所を明らかにし、DCX のサービス要件を論じる。

図 1.12 に既存の大容量光ネットワークを示す。(a) の階層化リングは、ROADM を適用したことで拡張性に優れ、かつリングトポロジーを活用した Protection を適用し障害発生時の経路切替を高速に行うことで高い信頼性を保

ROADM: Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer  
 FTTH: Fiber To The Home  
 TRx: Transceiver

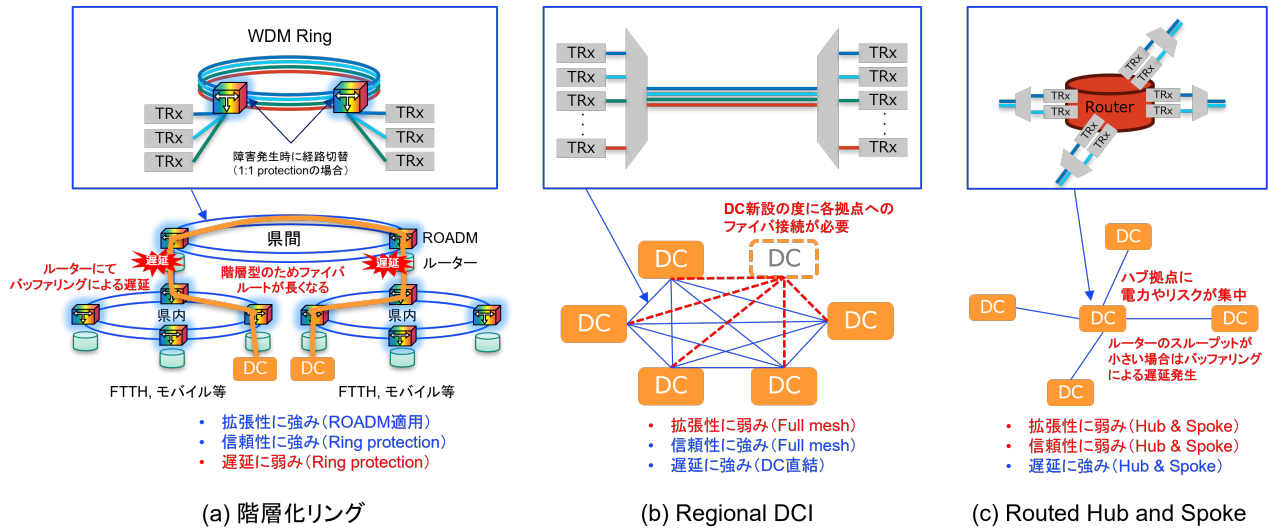


図 1.12 階層化リング・Regional DCI・Routed Hub and Spoke の比較

証できる点に強みがある。その一方で、階層化のためファイバルートが長くなったり（図のオレンジ線は県間を跨ぐ接続の例）、多くのコンシューマーを効率よく収容するためのルーターによってバッファリングによる遅延が発生しやすい等、DC 間通信にとって重要な低遅延性を満たすことが難しい。(b) の Regional DCI は各 DC 間をダークファイバーで直結するため遅延を小さくでき、かつ DC 間をフルメッシュで接続するために信頼性に強みがあるが、DC を新設する度に新 DC から全ての既存拠点へのファイバー接続が必要になるため、拡張性に弱みがある。(c) の Routed Hub and Spoke は中央のハブ拠点に電力やリスクが集中するため、ここがボトルネック要因となって拡張性・信頼性を確保することが難しい。また、(a) に比べればファイバー伝搬遅延は比較的小さいと言えるが、ハブ拠点のルーターのスループットが十分でない場合はバッファリングによる遅延が大きくなる。

図 1.13 は筆者が提案する DCX のアーキテクチャとその長所を示す。右中央は Point Of Presence (POP) の構成例で、Demux・Wavelength Selecting Switch (WSS)・Mux を組み合わせることで波長多重された光信号から任意の波長の光信号を Add/Drop する様子を示す。DCX はフルメッシュや Hub and spoke と違い、ROADM 技術を備えた POP 間をファイバーで接続し、コントローラーで集中制御する構成をとっている。また波長 1～3 の例のように、多くの拠点からの光信号を波長多重技術によって効率的に収容可能で、ネットワークの拡張性を確保できる。さらに、階層化リング網と違って各拠点を光 WDM パスで直結するため、低遅延サービスの提供も可能である。図中の青線で示した波長 3 のように、光パス自動設計・運用技術を導入できればオンデマンドな迂回も可能で、高い信頼性も担保できる可能性を秘めている。

上記のように DCX は多くの長所があるが、実現のためにはユーザー・クラウド事業者・MEC 事業者が所有している多種多様な装置 (TRx や伝送路システム) 同士を最適化して速やかに接続する技術が必要となる。現在、コヒーレント TRx のデータプレーンについては、Open ROADM や 400ZR、OpenZR+ 等が仕様化済みで相互接続可能な

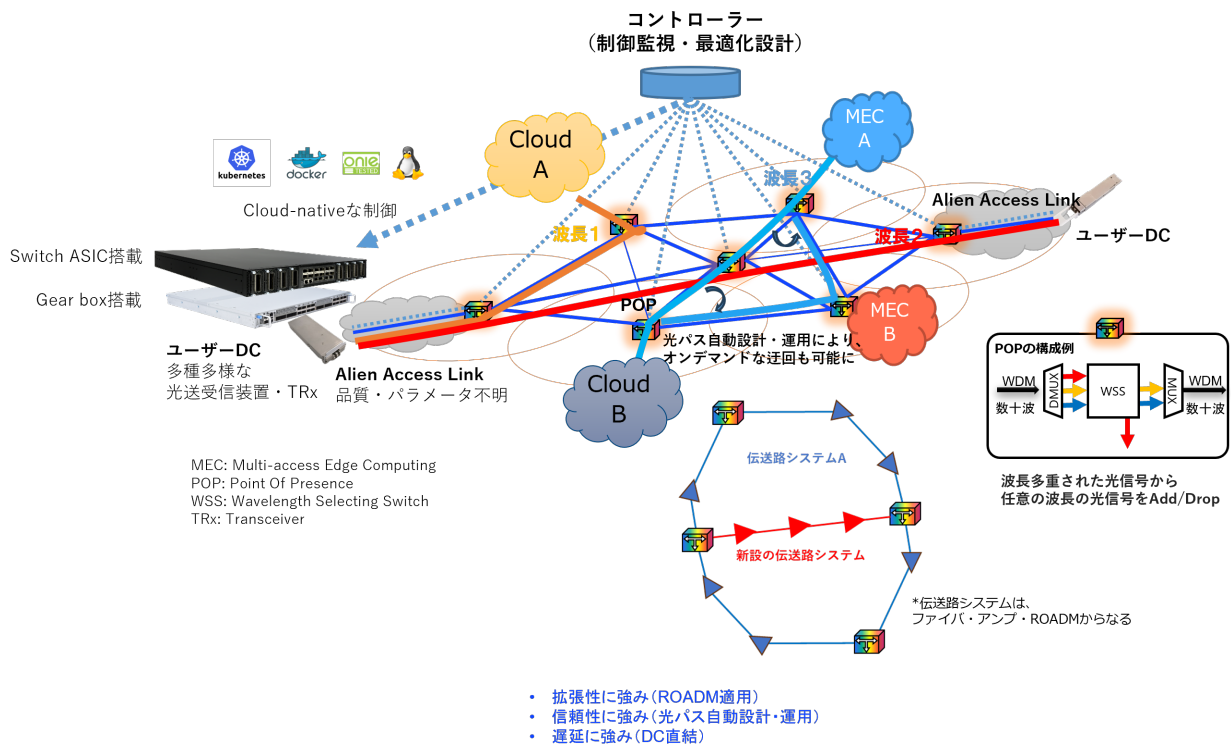


図 1.13 提案する DCX のアーキテクチャ

市中品が普及しているが、遠隔に設置された多種多様な TRx を制御・監視するコントロールプレーン及び TRx 間のモードの最適化手法については技術が確立されていない。伝送路システムについては、異なるベンダ装置間で相互接続するための技術が確立されておらず、複数の伝送路を跨って光波長パスを最適化することができない。

ここで、階層化リングも Regional DCI も、一事業者が自社設備内に光送受信装置や伝送路システムを設置・運用する前提であった点も重要なポイントである。これらの装置は DCX サービスを提供する事業者のビルではないところに設置されているのが一般的であり、ユーザーが接続したい任意拠点間の多様なトポロジーに対応し、かつ品質やパラメーターが不明なアクセス回線である Alien Access Link (AAL) を経由して E2E を接続する技術と運用手法を開発する必要がある。また、電気変換を減らしてユーザー DC 間を光で直結することは、電気段で品質をモニターする箇所・パラメーターが減少することと等価であるため、伝送路システムの最適化や品質モニタリングに対して新たな技術と運用手法を開拓していく必要がある。さらに、キャリアは事故・バグ・悪意を持った攻撃等によるイレギュラーな接続を回避して、ネットワークのセキュリティや堅牢性を確保する技術が必要となる。

## 1.2 本研究の目的・課題・目標

この節では、これまでの節で述べた内容を総括し、本研究の目的・課題・目標について論じる。

1.1.4 節では、デジタルコヒーレント技術の性能向上・普及により、光伝送技術分野にキャリア・DC クラウド等の様々な業種が参加して、オープンな設計ツールの開発、オープンな制御 IF の制訂が進展してきたことを述べた。続いて 1.1.5 節では DC 内に焦点をおき、仮想化技術によってハードウェア・ソフトウェアが分離され、オープンイノ

バージョンで市場が拡大し技術が成熟、OSS による自動運用が普及している状況について述べた。このような二つのイノベーションが世界中に普及したことにより、光伝送は長距離大容量化が進み、DC は高効率・高信頼に大容量化を実現し、ビデオ会議や SNS などのクラウドサービスはグローバルに普及・拡大を続けてきた。

一方で、1.1.6 節で述べたように地域の電力供給限界・立地不足やセキュリティ等の課題に直面し、分散配置・広域化が進んでおり、DC 間を接続するネットワークの需要が急増している。更に、アプリケーションも進化を続けていく。今後は、現実世界の物体や環境から収集したデータを使い、仮想空間上に全く同じ環境を再現する「デジタルツイン」と呼ばれる技術の普及が進み、ユーザーに近いエッジ DC（同じ都市内など）を効率よく活用した大容量低遅延なネットワークに対する要望が拡大していくと予想されている。今後 AI 技術の普及によって莫大なコンピューティングリソースの消費が予測されている中、取り巻く環境の変化と新しいアプリケーションの提供を許容しながら、スケーラブルかつサスティナブルにトラフィックを収容可能な将来のインフラ構築は喫緊の課題である。

このような将来インフラの課題を受けて、1.1.7 節にて、メトロエリアに分散された多数の DC からなる仮想的な大規模 DC を実現する DCX サービスへの期待が高まっていることを述べ、1.1.8 節にて、従来ネットワークとの比較から DCX のアーキテクチャの特徴と、これを実現するためのサービス要件について論じた。これらをふまえ、本研究では「従来手法では実現が難しい低遅延・拡張性・信頼性・柔軟性を同時に満たし、遠隔に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の機器を接続可能とし、オペレーター主導で自動運用などの新機能を追加可能な DCX インフラアーキテクチャを提案・実証する」ことを目的とする。

図 1.14 に、図 1.13 に示した提案アーキテクチャに対応する DCX サービス実現に向けた課題を示す。DCX は面

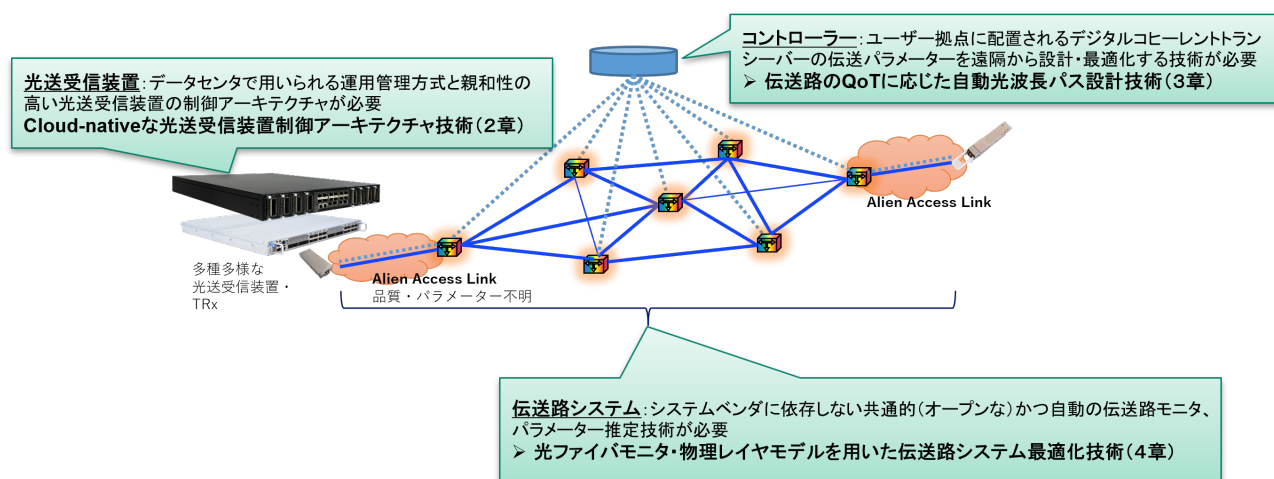


図 1.14 解くべき課題

的に展開した多対多の DC 拠点間において、光波長パスを用いて多種多様なユーザーの TRx 間を需要に応じてオンデマンドに接続する。

#### ■1.2.0.1 光伝送装置に関する課題

前節で述べたように、光伝送装置についてはキャリア・DC・クラウド事業者が持つ光送受信装置・TRxを Cloud-native に遠隔から制御可能とし、自動運用やデジタルツイン等の新機能をオペレーター主導で追加可能で、ユーザー拠点からのイレギュラーな接続を回避してネットワークのセキュリティ・堅牢性を確保可能とすることが求められる。本論文では、「DC で用いられる運用管理方式と親和性の高い光送受信装置の制御アーキテクチャ（Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャ技術）」の実現を光送受信装置の課題とする。この課題の要件は、以下の3項目からなる（要件の背景・詳細は2.1.1 節で後述する）。

##### 異なったハードウェアコンポーネントを搭載した光送受信装置を用いて提供

一つのアーキテクチャで、ハードウェアとソフトウェアへの影響を最小限に抑えながら、キャリア系コンポーネントと DC クラウド系コンポーネントを効率よく収容できること

##### 様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応でき、将来技術をオペレーター主導で追加可能

ハードウェアとソフトウェアが分離され、様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応できること、OSS を用いたハードウェアコンポーネントのモニタ・制御が容易で、自動制御やデジタルツイン等の新しい技術を適用しやすいこと

##### ユーザービルに光送受信装置を設置・運用

DCX オペレーターによる遠隔からのユーザー機器の監視・制御が可能で、アップデートや故障切り分け、及びイレギュラーな接続の回避を効率的に実施すること

#### ■1.2.0.2 コントローラーに関する課題

コントローラーについては、柔軟性・信頼性を向上するためにユーザーと協調したオンデマンドなプロビジョニング・迂回を可能とし、任意拠点に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の TRx・任意拠点間の多様なトポロジーに対応し、かつ品質やパラメーターが不明なユーザーアクセス経路で、遠隔から設計・最適化することが求められる。本論文では、「ユーザー拠点に配置されるデジタルコヒーレントトランシーバーの伝送パラメーターを遠隔から設計・最適化する技術（伝送路の QoT に応じた自動光波長パス設計技術）」の実現をコントローラーの課題とする。この課題の要件は、以下の3項目からなる（要件の背景・詳細は3.1.1 節で後述する）。

##### ユーザー TRx 特性を参照したプロビジョニング・リルートが可能

ユーザーと DCX オペレーターが協調し、キャリアがユーザー TRx 特性を参照して光 WDM パス設計を実現できる仕組みを備えること

##### 任意の多対多拠点間の多様なトポロジーに対応

多対多の拠点間において、発生する誤差を小さく抑えたまま短時間で効率よく E2E 光パスを設計可能とすること、ファイバー伝搬や光ファイバーアンプ・光送受信装置のノイズによる光信号品質の劣化を遠隔から短時間で算出し、装置に設定すること

#### 距離や QoT に応じた最適モードの自動選択

任意の距離・ファイバー品質でのユーザー間接続を可能にするため、複数ベンダ・複数伝送モードでの自動最適モード選択を可能とすること

### ■1.2.0.3 伝送路システムに関する課題

伝送路システムについては、各種伝送路システム、品質やパラメーターが不明な回線を使った提供を可能とし、従来手法と適合して実用的・効率的に最適化や品質モニタリングでき、遠隔からの自動運用を可能とするためのアーキテクチャ・モデル・モニタ技術が求められる。本論文では、「システムベンダに依存しない共通かつ自動の伝送路モニタ・パラメーター推定技術（光ファイバーモニタ・物理レイヤモデルを用いた伝送路システム最適化技術）」の実現を伝送路システムの課題とする。この課題の要件は、以下の3項目からなる（要件の背景・詳細は 4.1.1 節で後述する）。

#### 既設ベンダ以外の装置を用いて新設の伝送路システムを構築したいケースに対応

ブラックボックス的なアプローチでなく、物理モデルに基づく伝送路設計に必要な全てのリンクパラメーターの推定ができ、機器タイプやベンダの変更に対しても汎用性があること

#### 品質やパラメーターが不明な回線を使った提供

専門技術者の派遣や追加ハードウェアなしにスパン毎の伝送路品質（QoT）を遠隔からモニタして最適化・設定できること

#### 従来運用手法に適合しつつ、迅速にプロビジョニングや不具合切り分けを実施

不具合が発生した際に工事担当者がそれを目視で確認でき、予期せぬ問題が発生した場合に操作を元に戻せること、工事実施後（5時間）もシステムが安定して動作し QoT が変動しないこと

### 1.2.1 達成目標

この節では、前節に述べた課題を踏まえて、DCX が達成すべき目標値について論じる。下記に示す目標をフィールドファイバーを用いて実証する。

**光送受信装置** 前節に示した、異なったハードウェアコンポーネントを搭載した光送受信装置を用いて提供、様々な

NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応でき、将来技術をオペレーター主導で追加可能、ユーザービルに光送受信装置を設置・運用の3つの要件を満たし、DC で用いられる運用管理方式と親和性の高い光送受信装置の制御アーキテクチャを実現可能であることを実証する。フィールドファイバーを用いた実証では、ユーザー機器に DCX オペレーターのエージェントを送信し、起動から監視制御に至る一連のシーケンスを実施できることを確認し、完了までの時間を一般的な Customer Premises Equipment (CPE) 端末に実施するのと同程度の 10 分以内とする。

**コントローラー** 前節に示した、ユーザー TRx 特性を参照したプロビジョニング・リルートが可能、任意の多対多拠点間の多様なトポロジーに対応、距離や QoT に応じた最適モードの自動選択の3つの要件を満たし、ユーザー拠点に配置されるデジタルコヒーレントトランシーバーの伝送パラメーターを遠隔から設計・最適化可能であることを実証する。フィールドファイバーを用いた実証では、ユーザーの受信機の感度を考慮しながら、リンク性能が最大になるように TRx のパラメーター（ビットレート・変調フォーマット・FEC など）を設定するオンデマンドな WDM プロビジョニングを、人手を介さずに自動的に実施する。この際、工事担当者がユーザー DC に入館して工事を実施する作業時間が1時間であるケースを想定し、プロビジョニングに割り当て可能な時間を 10 分以内とする。WDM プロビジョニングの精度については、システムの GSNR 変動値をリファレンスとし、WDM プロビジョニングに起因する変動値をシステムの変動値と同じ桁に収めることを目標値とする。

**伝送路システム** 前節に示した、既設ベンダ以外の装置を用いて新設の伝送路システムを構築したいケースに対応し、品質やパラメーターが不明な回線を使った提供を可能とし、従来運用手法に適合しつつ、迅速にプロビジョニングや不具合切り分けが可能であることの3つの要件を満たし、提案する技術・方式をもって、システムベンダに依存しない共通のかつ自動の伝送路モニタ・パラメーター推定が可能であることを実証する。フィールドファイバーを用いた実証では、現用の伝送路システムから新規のシステムに切替工事を行う際、自動化・最適化に必要なハードウェアの追加を最小限（伝送路システム当たり 1 式程度）に抑えつつ、伝送設計に必要な全ての物理パラメーターを伝送路から抽出して可視化し、別のタイムゾーンにいる監督者がオープンなツールを用いて設計・解析し、工事の完了または切り戻しを判断できることを確認する。作業時間については、既存の DCI の伝送路システム工事の場合にユーザーから回線借用する際のメンテナンスウィンドウが2時間程度であるため、この半分の 1 時間以内を目標とする。この最適化手法の精度については、工事担当者を現地派遣して最適化を行う際の設計誤差以下に抑えることとする。

DCX はメトロエリアに分散した多数の DC を拡張性・信頼性・低遅延性を確保しつつ、ユーザーアクセス回線・多種多様な TRx や伝送路システムの接続・イレギュラーな接続の回避を可能とすることで、仮想的な大規模 DC を実現する。取り巻く環境の変化と新しいアプリケーションの提供を許容しながら、スケーラブルかつサステナブルに

トラフィックを収容可能な将来のインフラとして期待されている。本節で示した到達目標を達成することで、従来手法では実現が難しい低遅延・拡張性・信頼性・柔軟性を同時に満たし、遠隔に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の機器を接続可能とし、オペレーター主導で自動運用などの新機能を追加可能な DCX インフラアーキテクチャを実現できる。

### 1.3 本論文の概要と構成

1.1 節では、光伝送技術の進化、仮想化技術の進化、取り巻く環境の変化を通して、本研究の対象である DCX への期待とサービス要件について説明した。1.2 節では、階層化リング・Regional DCI・Routed Hub and Spoke といった現在のネットワークに対する DCX の特徴を明らかにし、それを実現する際の光送受信装置・コントローラー・伝送路システムに関する課題と到達目標を述べた。図 1.15 は本論文の構成を示す。

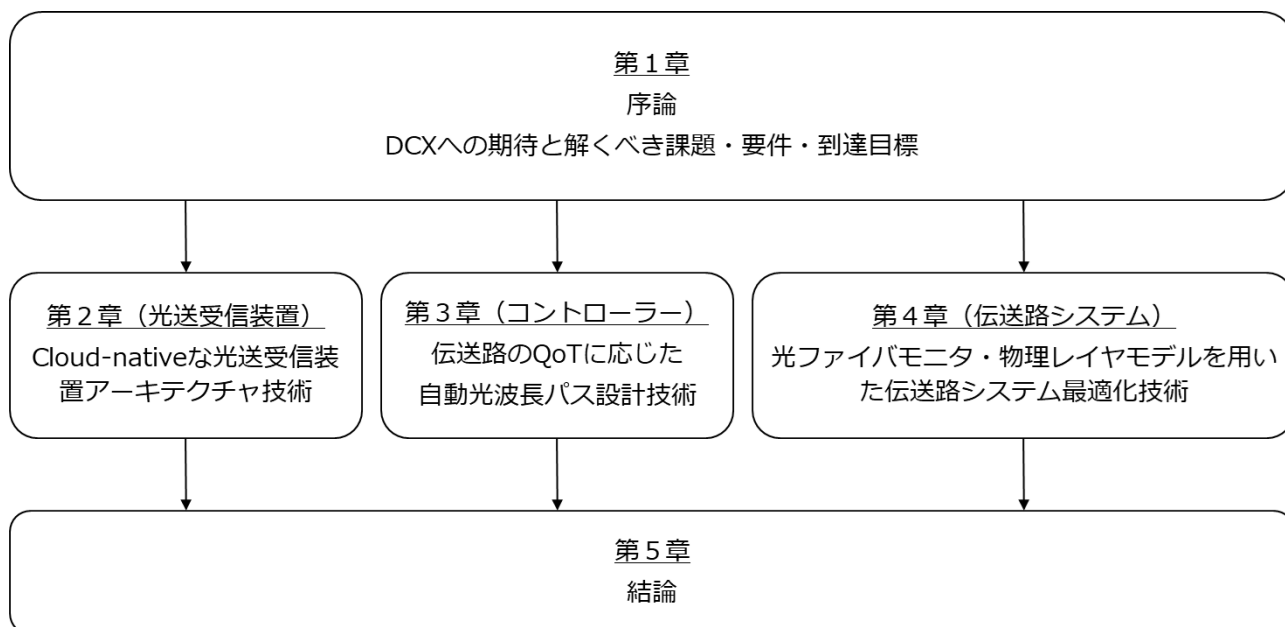


図 1.15 論文の構成

第2章では、はじめに1.2節で述べた光送受信装置の課題をさらに深く論じ、2.1.1節にて光送受信装置の現状と要件について論じる。続いてCloud-nativeな光送受信装置アーキテクチャ技術を2.2節で提案し、このアーキテクチャの利点と実績を2.3節で論ずる。サーバー系技術に対応可能な光送受信装置のアーキテクチャを実現し、オープンIFの活用とOSSとの親和性により、ユーザーDCに設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の光送受信装置・TRxをCloud-nativeに制御可能とする。

第3章では、1.2節で述べたコントローラーに関する課題をさらに深く論じ、3.1.1節にてコントローラーの現状と要件について論じる。続いて、ユーザーの任意拠点に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者のTRxを、ユーザーアクセス経由で遠隔から制御・監視・最適化する技術を提案する。先に示した光送受信装置を活用し、米国COSMOSテストベッドに配備されたフィールドファイバーを用いて、伝送路のQuality of Transmission (QoT)に

応じたオンデマンドな WDM プロビジョニング技術を実証した結果を示す。

第 4 章では、1.2 節で述べた伝送路システムに関する課題をさらに深く論じ、4.1.1 節にて伝送路システムの現状と要件について論じる。続いて、システムベンダに依存しない共通的かつ自動の伝送路モニタ・パラメータ推定技術を提案する。米国 Duke 大テストベッドに配備されたフィールドファイバーを用いて、1 時間以内でのプロビジョニングを実施した結果を示すとともに、同技術を故障箇所特定に応用した結果を示す。

第 5 章では第 2 章から第 4 章で述べた研究の成果を総括し、本研究によって 1.2 節に示した目標が達成できたことを示す。

## 2 Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャ技術

### 2.1 はじめに

本章では、ユーザー DC に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の光送受信装置・TRx を Cloud-native に制御可能とする光送受信装置について論じ、フィールド実証などの実験結果を通して 1.2.1 節の光送受信装置に関する目標（以下）を達成したことを示す。

- DC で用いられる運用管理方式と親和性の高い光送受信装置制御
  - － 異なったハードウェアコンポーネントを搭載した光送受信装置を用いて提供
  - － 様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応でき、将来技術をオペレーター主導で追加可能
  - － ユーザービルに光送受信装置を設置・運用
- 数値目標：ユーザー機器に DCX オペレーターのエージェントを送信し、起動から監視制御に至る一連のシーケンスを、フィールドファイバーを用いて以下の条件で実証
  - － 完了までの時間を一般的な Customer Premises Equipment (CPE) 端末に実施するのと同程度の 10 分以内

はじめに 2.1.1 節にて、1.2 節で述べた光送受信装置に関する課題に基づき、光送受信装置の現状と要件について論じる。2.2 節にて、Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャのベースとなる、コヒーレント技術を実装できるホワイトボックスのアーキテクチャを提案する。続いてこのアーキテクチャ実現のための重要な要素である、DSP ASIC 用 SDK の開発と ACO 接続、Transponder Abstraction Interface、ホワイトボックス型光送受信装置ハードウェア、OSS 活用を促進する Linux-based プラットフォーム実装について説明し、これらを活用した、自動運用を可能にするモニタリング機能について論ずる。2.3 節にて、提案したアーキテクチャの利点と実績を示し、2.1.1 節に示した要求条件と 1.2.1 節に示した光送受信装置に関する到達目標を達成できたかどうかを示す。最後に、2.4 節で本章のまとめを述べる。

#### 2.1.1 光送受信装置の現状と要件

1.1.5 節で述べた DC 内の技術革新と並行して、5G や VR 関連技術の開発・普及が進み、これまで不可能だった全く新しいサービスの出現が期待されている。例えば離れたデバイス間のリアルタイム通信は、自動運転や遠隔医療のようなリアルで高品質な体験を可能にする [48, 49]。前節のデジタルツイン技術を例にとると、製造ライン上に設置した各種センサーから取得した生体データ、制御データ、温度・CO<sub>2</sub> 濃度データなどをリアルタイムにデジタルツイン上に反映し、異常予測機能を用いて重大インシデントを未然に防ぐ、または設備異常に適切に対応できるベテラン

技術者が現場に不在の場合にリモートで対応できる仕組みを構築するなど、ビジネス環境での活用がすでに始まっている [50]。このような新サービスを広域で展開するためには、ユーザーから遠く離れたハイパースケール DC に加えて、ユーザーに近いエッジ DC（同じ都市内など）を効率よく活用して低遅延にサービスを提供する必要があるため、キャリアのセントラルオフィスがエッジ DC の役割を果たすことも期待されている [51]。これに伴い、大規模 DC 間のトラフィックに加え、エッジ DC とハイパースケール DC 間のトラフィックも今後大幅に増加すると予想される。

従来、DC と光ネットワークの技術はそれぞれ独立に開発されてきたが、今後は上記のような新しいサービスを提供するために、DC のソフトウェアと光ネットワークの入り口に設置される光送受信装置が密に連携可能で、新しい要求に柔軟に対応しながら、スケーラブルで継続的に容量を拡張するネットワーク・アーキテクチャが必要となる。

図 2.1 は DC 運用における仮想化技術の現状を示す。サーバーやスイッチについては、1.1.5 節にて示したようにハー

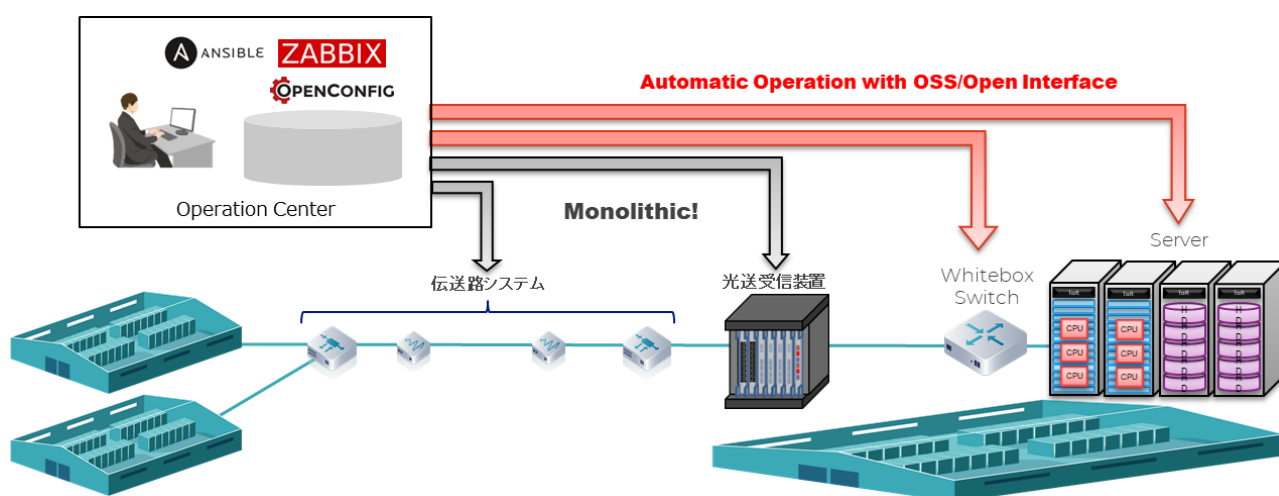


図 2.1 DC 運用における仮想化技術の現状：モノリシックな伝送装置

ドウェア・ソフトウェア分離技術が普及し、サーバーなどの機器の管理作業を効率化・自動化する Ansible、統合監視ツールの ZABBIX 等の OSS と、OpenConfig 等のオープンな制御インターフェースによって自動制御・運用が一般的となっている（図中の赤線）。このような技術革新を背景に、近年では DC の構築において、計画段階から DC のインフラ全体をシミュレーションし、構築・運用管理を通してシミュレーション結果と物理環境の測定結果を同期し最適化する、「DC のデジタルツイン」が注目を集めており、DC 内の多種多様なハードウェアの制御自動化が既に成熟して高度なオペレーションが実現されていることが分かる [52]。一方、図 2.1 に示すように光送受信装置については、多種多様な光送受信装置ハードウェアを OSS 等で Cloud-native に制御可能とするためのアーキテクチャが定義されておらず、オペレーターは DC 間の光伝送部分まで含めた自動制御・運用や、デジタルツインのように多種多様なハードウェアが連携した高度なオペレーションを実現することができない。このため、例えばある地域で電力供給が限界に達した、または被災により DC がダメージを受けた場合などに、もっと電力供給余力のある地域の DC 内に新しいサーバーリソースを立ち上げて冗長化を図るといったユースケースを考えた場合、DC 間の光伝送部分がボトルネックとなって、コンピューティングとネットワークが連携した冗長化を実現することが難しい（伝送路シス

テムについても同様の課題があるが、これについては 4.1.1 節で後述する)。

#### ■2.1.1.1 装置アーキテクチャの比較

ここで、垂直統合型の光送受信装置と、既に Disaggregate された Whitebox switch の装置アーキテクチャを比較分析する。光送受信装置は、キャリアによる専用線サービスのように極めて高い信頼性が要求されるアプリケーションが主用途であったため、垂直統合型のビジネスモデルに基づいた専用装置のアーキテクチャをベースに開発がなされてきた。図 2.2 の (a) は従来の垂直統合型の光送受信装置のイメージを示す。トランスポンダから、アンプや

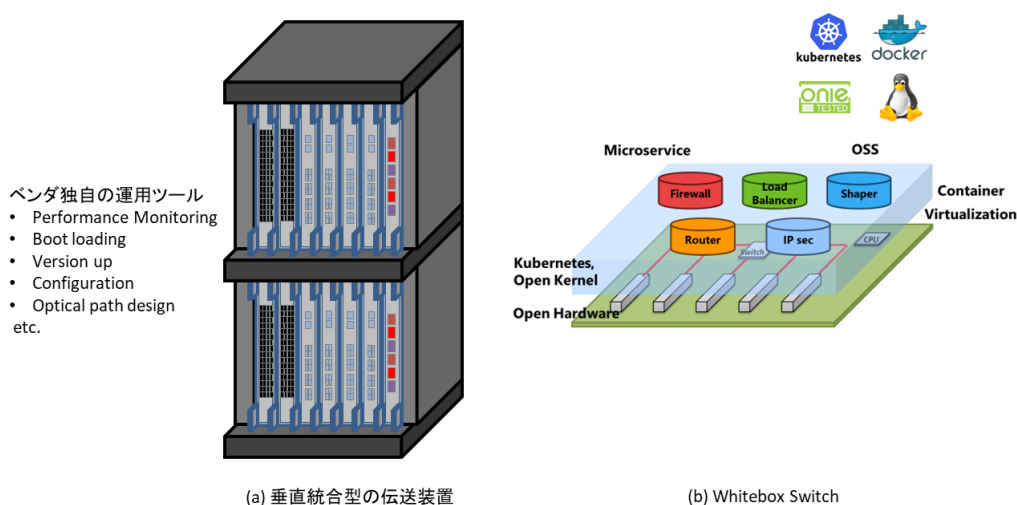


図 2.2 垂直統合型の光送受信装置と Whitebox Switch のイメージ

ROADM 等の伝送路システムまでネットワーク構成要素がベンダ独自仕様品で構成されており、かつ装置を制御する運用ツールもベンダ供給品を用いるのが一般的となっている。シングルベンダで構成されているため、装置ベンダの独自機能を使って性能・信頼性の向上並びに各コンポーネントを連携させた自動化がしやすい一方で、オペレーターのニーズに合わせて仕様変更や機能拡充するには、オペレーターは装置を開発したベンダに頼る以外に方法がなく、柔軟性や拡張性に課題がある。(b) は Disaggregate された Whitebox Switch のイメージを示しており、Kubernetes・Docker 等のオープンなサーバー系プラットフォーム技術に対応し、Open Network Install Environment (ONIE) 等のオープンなインストールツールが適用でき、Disaggregation 構成により TRx 等のネットワークコンポーネントを柔軟に収容する。この構成ではハードウェアとソフトウェアが分離されているため柔軟性と拡張性が高く、デジタルツイン等の新しい技術を適用しやすい。異ベンダ製品を組み合わせるため、性能・信頼性向上や自動化を進めるにはオペレーターが自身で最適化などのノウハウを蓄積する必要があるが、これらの技術課題をクリアできれば後者の方が理想的である。図 2.2 のような違いが生じる理由を、装置アーキテクチャの観点から分析する。図 2.3 は垂直統合型の光送受信装置と Whitebox Switch の装置アーキテクチャの違いを示す。(a) 垂直統合型の伝送装置は、Host Central Processing Unit (CPU) を備えた Main board と Field-Programmable Gate Array (FPGA) を備え

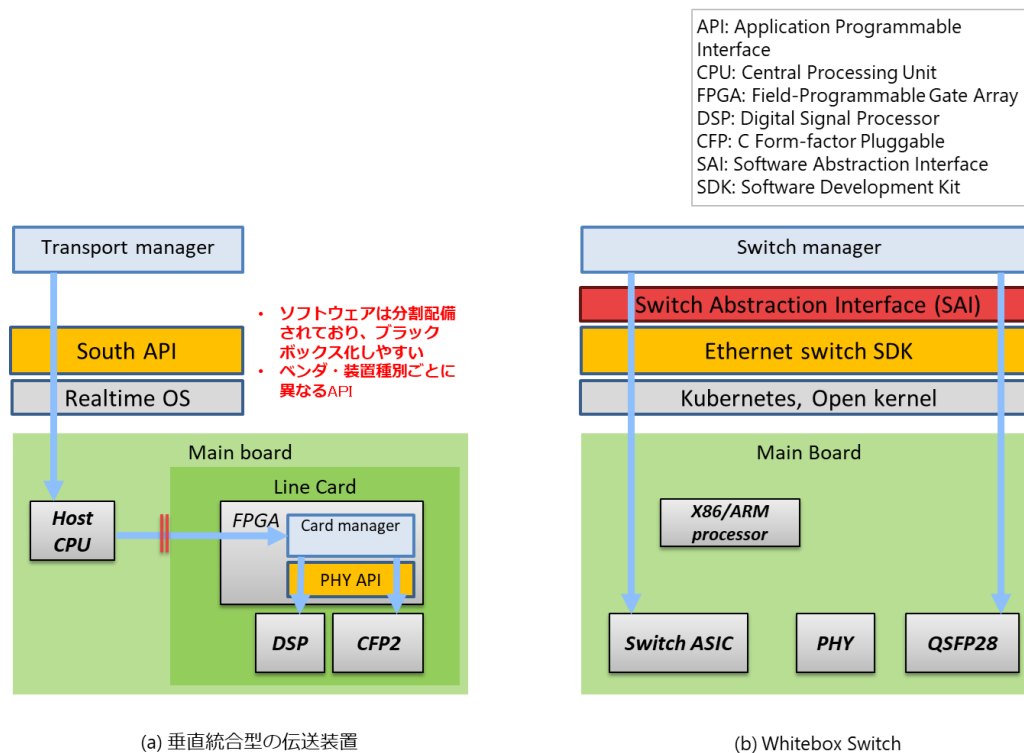


図 2.3 垂直統合型の光送受信装置と Whitebox Switch の装置アーキテクチャの違い

た Line card からなり、Host CPU と FPGA のそれぞれについて South と PHY の異なる API が定義され、Main board と Line card 間にもベンダ固有の IF が定義されている。Transport manager はこれらの IF を介して各コンポーネントを制御するため、これらの IF を定義した伝送装置ベンダのみが新機能の追加開発が可能である。これらの IF 仕様は装置ベンダ・Line card ベンダごとに異なっており、かつ Manager ソフトウェアが Host CPU 制御用と Line card 用に分離されているため、ハードウェアとソフトウェアを分離するのは容易ではない。

一方、図 2.3 (b) Whitebox Switch の場合はハードウェアとソフトウェアの分離が進んでおり、X86/ARM processor を搭載した Main board 上に Switch ASIC や Ethernet 等のコンポーネントが実装され、これらが Open Kernel・Switch SDK・Switch Abstraction Interface を通して一つの Switch Manager から直接制御できるようになっている。SAI は、マイクロソフトが主導するスイッチ ASIC の共通 Hardware abstraction IF で、2015 年に OCP プロジェクトとして正式に認定された。Broadcom や Mellanox（現 NVIDIA）など 8 社のスイッチ ASIC ベンダが SAI をサポートし、ネットワークスイッチのオープン化が加速した。SAI は、スイッチ ASIC を制御するソフトウェア・コンポーネントである Switch Manager を、スイッチ ASIC から独立して開発することを可能にした。SAI は OSS としてオープンに開発されたため、Switch Manager も OSS として開発が可能である [34]。このように、Whitebox Switch の場合には遠隔から Cloud-native に制御可能で、デジタルツイン等の新しい運用に対応しやすいアーキテクチャが既に構築され普及している。

これらの比較結果より、垂直統合型の光送受信装置を使って DCX サービスを提供する際の課題をまとめると以下の 3 つになる。

- ハードウェアとソフトウェアが密結合し、かつベンダや装置種別ごとに独自仕様となっているため、DCX オペレーターが遠隔から管理・制御する機能を開発する際には、ベンダ数と装置種別の積の分の開発規模が必要になる
- DCX オペレーターは日々の運用をベンダ独自のツールに頼らざるを得ず、ベンダ各社の機器に対応したオペレーションシステムの開発・技術習得を、ベンダ数の分だけ実施しなくてはならない
- ソフトウェアが分割配備されているため、ハードウェアコンポーネントの制御部分がブラックボックス化されやすく、オープンイノベーションによる Automation やデジタルツイン等の技術開発の妨げになる

#### ■2.1.1.2 フォームファクターの多様化

DSP ASIC やシリコンフォトリソグラフィなど、光コンポーネントにおける最近の技術革新によって製品開発サイクルが短縮化されてきており、その結果として新しい世代のデバイスが2年程度の短いスパンで市場に投入されるようになった。さらに、市場に出回るフォームファクターの種類や世代も大幅に増加している [quad small form-factor pluggable: QSFP、octal SFP: OSFP、C form-factor pluggable: CFP/CFP2/CFP4/CFP8、Consortium for On-Board Optics: COBO [53]、Analog Coherent Optics (ACO)/Digital Coherent Optics (DCO) など]。図 2.4 は

### FORM FACTORS

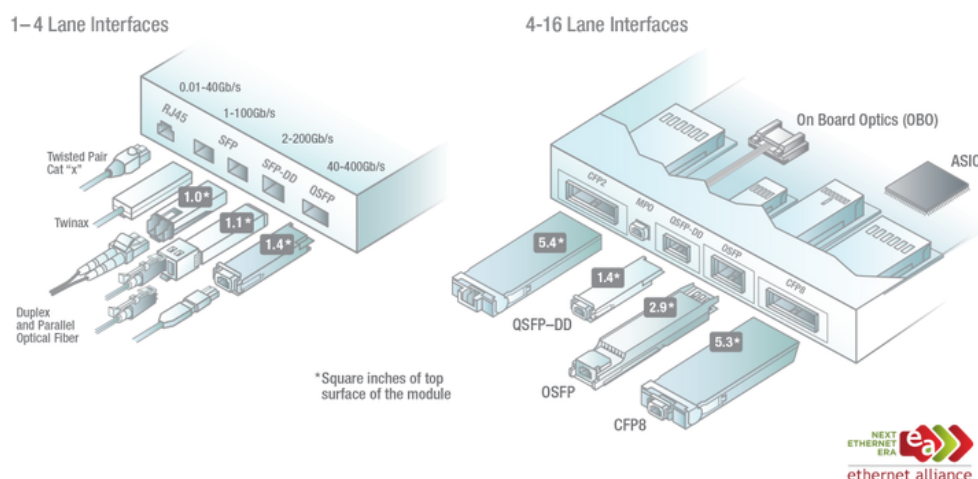


図 2.4 200G/400G pluggables (出典: <https://ecin.ca/blog/200g-and-400g-form-factors-explosion/>)

Ethernet Alliance が作成した 200G/400G プラガブルモジュールの実装イメージを示す。このようなフォームファクターの多様化は、光ネットワークを構築・運用する通信・インターネットコンテンツ・DC などのサービスプロバイダが増え、これらのオペレーターがそれぞれ異なるフォームファクター要件を持つことに起因している。例えば、キャリアは CFP を L1 の多重化 ASIC である Gearbox で多重化し、Ethernet や OTN を利用することが多いが、DC・クラウド事業者は QSFP や OSFP 等の比較的小型のフォームファクターをスイッチやルーターで収容し、

Ethernet ASIC で多重することが多い。ここで、DCX サービスを遅滞なく提供するためには、機器接続性による事故を防ぐ必要がある。例えば、複数のベンダ・フォームファクターの TRx を使用する場合、NOS と TRx の仕様の不一致により、ユーザー機器から入力される光パワーが規定値を超えたり、ネットワーク接続時に想定外の光周波数の信号がネットワークに入力されるなどのイレギュラーな接続が発生する可能性がある。MSA により規定された TRx であっても、ベンダが彼らの顧客の要求に応じて MSA 外の仕様を実装する場合や、パラメーターの単位が dBm やリニアパワー (mW) などベンダ間で異なる場合が実際に存在する。また、各ベンダの TRx がカバーする光周波数帯はそれぞれ異なるため、ベンダが定義する f1 に対応する光周波数もそれぞれ異なる。このような理由から、ユーザーサイトにおいて NOS と TRx の仕様不一致による障害が発生した場合、キャリアが遠隔でシステムを復旧させることは困難である。

#### ■2.1.1.3 障害発生時の原因究明

サービス開始後にユーザーサイトで障害が発生した場合、DCX サービスプロバイダであるキャリアは、自ら障害を切り分ける必要がある。キャリアがユーザーサイトで TRx を監視・制御する方法としては、オープンな YANG モデルを使用して NOS 経由でコントローラーから TRx を管理するか、TRx 内にリモート監視・制御機能を実装する方法があり得る。しかし、ベンダ独自の故障検査や調査機能を利用して、ユーザーサイトに設置された TRx を監視・制御するためのオープンな仕様はこれまでに定義されていない。ネットワーク設計と運用の自動化のために、従来の標準化された YANG モデルを強化する努力はなされているが [54]、これらのモデル上でベンダ独自の機能を利用するための IF は定義されていない。

以上のことから、DCX オペレーターの運用上の課題として、

- DCX オペレーターは、多様化するフォームファクターのそれぞれに対応し、障害発生時にはユーザーサイトにある光送受信装置・TRx の不具合切り分けを実施する仕組みが必要になる

についても検討する (なお、コントローラーとユーザー光送受信装置間の制御信号の物理的なネットワーク接続方式や、ユーザー認証方式は本論文の範囲外である)。

本節に示した課題より、DC で用いられる運用管理方式と親和性の高い光送受信装置の制御アーキテクチャの要件は以下のようにまとめることができる (1.2.0.1 節再掲)。

#### 異なったハードウェアコンポーネントを搭載した光送受信装置を用いて提供

一つのアーキテクチャで、ハードウェアとソフトウェアへの影響を最小限に抑えながら、キャリア系コンポーネントと DC クラウド系コンポーネントを効率よく収容できること

様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応でき、将来技術をオペレーター主導で追加可能

ハードウェアとソフトウェアが分離され、様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応できること、OSS を用いたハードウェアコンポーネントのモニタ・制御が容易で、自動制御やデジタルツイン等の新しい技術を適用しやすいこと

#### ユーザービルに光送受信装置を設置・運用

DCX オペレーターによる遠隔からのユーザー機器の監視・制御が可能で、アップデートや故障切り分け、及びイレギュラーな接続の回避を効率的に実施すること

## 2.2 提案する Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャ

Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャの実現において最もスムーズな方法は、すでに市場で確立されているホワイトボックス・スイッチ・アーキテクチャの上にトランスポンダ機能を追加することだが、そのためには、長距離通信用に開発されたデジタル・コヒーレント技術を実装し、制御・管理できる装置アーキテクチャが必要になる。デジタル・コヒーレント技術には、コヒーレント検出による高い受信感度、波長分散や偏波モード分散回路による波形歪みの補償、多値符号化による高い周波数利用効率など、さまざまな利点がある。しかし一方で、実装や構成の複雑さや多様性が、水平分業型ビジネスモデル普及の障壁となっていた。

図 2.5 は、Whitebox switch のアーキテクチャをベースとして、コヒーレントモジュールを新たに実装可能とする新しい光送受信装置（ホワイトボックスパケットトランスポンダ）のアーキテクチャを示す。図の右側には、従来の Whitebox Switch の Board 上に搭載されている Switch ASIC・PHY・QSFP28 等のコンポーネント群と、Open Kernel~Manager を動作させるための X86/ARM processor があり、上位の Manager (Configuration, Monitoring, Debugging) は Kernel のユーザーライブラリ（非特権ライブラリ）として実装された Ethernet switch SDK を経由してこれらのコンポーネントを直接制御する。図 2.5 の左側は、従来の Whitebox Switch のアーキテクチャに CFP2-ACO と DSP ASIC からなるコヒーレントモジュールを適用する場合のアーキテクチャを示す。CFP2-ACO には、Tunable Laser Diode (TLD)・Driver Module (DRV MOD)・Integrated Coherent Receiver (ICR) 等のコヒーレント送受信の光コンポーネントが実装されている。DSP には 4ch Digital-Analog Converter/Analog-Digital Converter (DAC/ADC)・DSP・FEC・Serializer/Deserializer などが実装されており、CFP2-ACO と DSP ASIC 間は（後ほど 2.2.1.3 節で説明するように）高速アナログ信号で接続される。ここで CFP2-ACO を、QSFP28 と同じように装置内の Form factor として、DSP ASIC を Coherent PHY として位置づけることで、従来の Whitebox Switch のアーキテクチャやシステム仕様をそのまま活用することができる [55]。なお図では省略しているが、このアーキテクチャを適用することで、ファン・電源・インジケータ等の周辺機器についても、Whitebox Switch により開拓された OCP 準拠のオープンハードウェアをそのまま活用可能である。

図中の点線で囲われた部分 (Optical Transport SDK・Abstraction Interface for Transport・Switchponder Board・



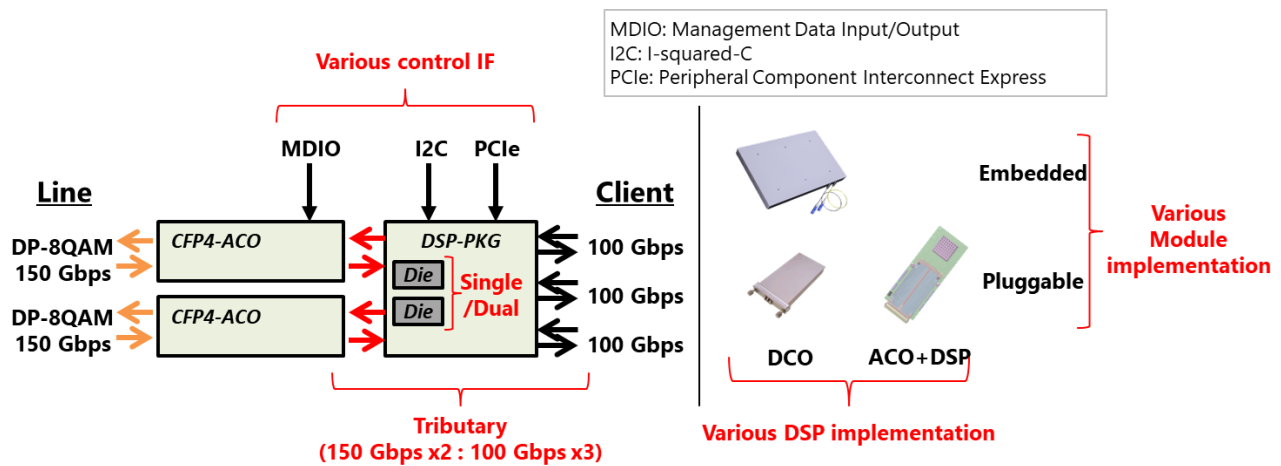


図 2.6 コヒーレント通信用ハードウェアの複雑さの例

さは、ベンダ間の違いにとどまらず DSP パッケージに実装される Die の数、制御 IF の種類、偏波多重や多値変調に伴う光パスの Tributary 制御やマルチフロー制御 [56]、DSP の実装方式、モジュールの実装方式なども含まれる。例えば制御 IF については、CFP は IEEE802.3 で規定された Management Data Input/Output (MDIO) によって制御されるが、DSP ASIC 等のようにボード上に実装された LSI の制御には I-squared-C ( $I^2C$ ) が使われるケースが多い。またボード上の LSI 制御に関しては、 $I^2C$  に加えて高速データ転送が可能な Peripheral Component Interconnect Express (PCIe) が使われるケースも増えてきている。

#### ■ 2.2.1.2 Transponder Abstraction Interface の標準化

2016 年には、キャリアネットワークで使用されるネットワーク機器の Disaggregation を目的とした Open Optical & Packet Transport (OOPT) プロジェクト [26] が Telecom Infra Project (TIP) 内で開始された。筆者らは Cumulus や Facebook (現 Meta) 等のパートナー各社と協力し、業界横断的な議論を通じてトランスポンダのハードウェアとソフトウェアの Disaggregation のための Transponder Abstraction Interface (TAI) の最初の仕様とアーキテクチャを 2017 年 12 月に提案した [57]。図 2.7 は Cumulus Networks(現 NIVIA) の Scott Emery 氏が作成した Voyager のハイレベルアーキテクチャを元に筆者が作成したもので、図 2.5 に示したように TAI はコヒーレントモジュール部分の Form factor と Coherent PHY の部分の制御を念頭に、Network Interface/module/Host Interface が定義された。筆者らはパートナー各社と協力して、コヒーレントモジュールのコンポーネントに対応する各 Object のパラメーターを制定した。コヒーレントモードの自動最適化に TAI を活用することを念頭に、Network Interface に Line rate ・ Modulation format ・ FEC type 等のコヒーレントモードのパラメーターを定義した。これらのパラメーターは対向のコヒーレント TRx を相互接続する際の最も重要なパラメーターであり、後ほど 3.2 節の図 3.5 に示すように、ユーザーサイトにある多様なコヒーレント TRx 間の Consistency check の際に必須となる。また、各ベンダの TRx は ITU-T G.694.1 に準拠しているが、各ベンダの製品がカバーする光周波数範囲、および各ベンダが

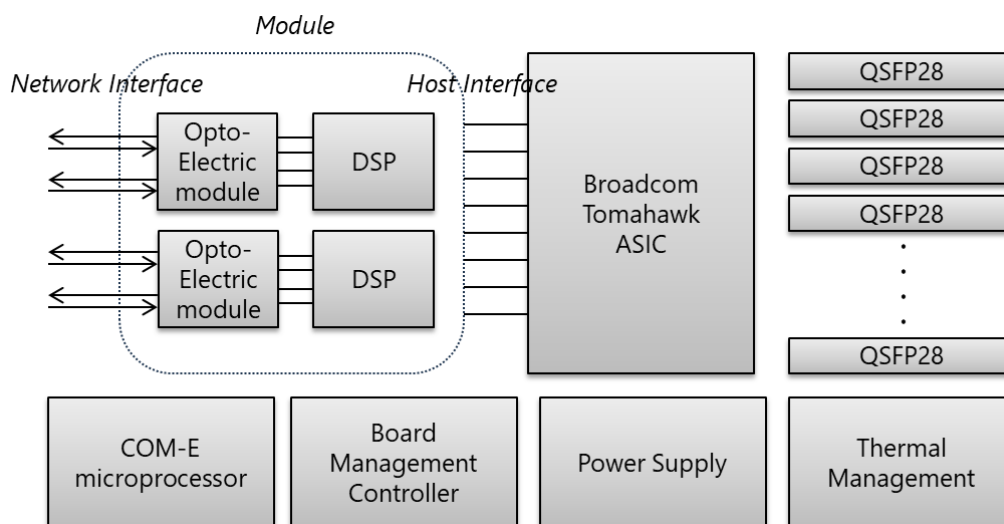


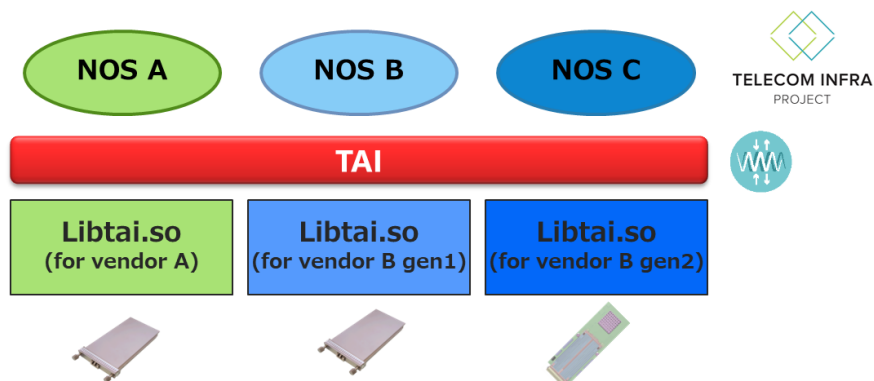
図 2.7 Module, Network Interface, Host Interface の定義 (Scott Emery 氏の図を元に筆者作成)

定義するチャンネル 1 の周波数は、一般にベンダごとに異なっている。このため、TAI は各周波数チャンネルをチャンネル番号ではなく、光周波数の値で定義できるように設計されている。さらに、NOS は TAI を通して各ベンダのモジュールの光周波数範囲を自動的に検出し、オペレーターに表示することができる。

図 2.8 に提案した TAI のアーキテクチャを示す。TAI は、1.1.5 節で説明した SAI に倣って C ヘッドファイ

**For Operators:** freedom of choice, individual hardware and software

**For NOS vendors:** removing complexity of hardware



**For Hardware vendors:** removing development redundancy among vendors without disclosing their own differentiating technologies.

図 2.8 TAI アーキテクチャ

ルとして定義し、その実装（C 共有ライブラリ）は通常各ハードウェアベンダから提供される。C 共有ライブラリ Libtai.so は、ベンダ提供の SDK（通常はベンダ秘匿情報としてバイナリで提供される）を含むため、各ハードウェアベンダから提供されるものとした [58, 59, 60]。

### ■2.2.1.3 DSP ASIC 用 SDK の開発と ACO 接続の自動化

ここでは、前節に示した Libtai.so を構成する SDK と、この開発を通して TAI に ACO 接続自動化機能を実装した実績について解説する。1.1.4 節の図 1.6 に示したように、Gen3 DSP から DSP ASIC 用の SDK が開発されるよ

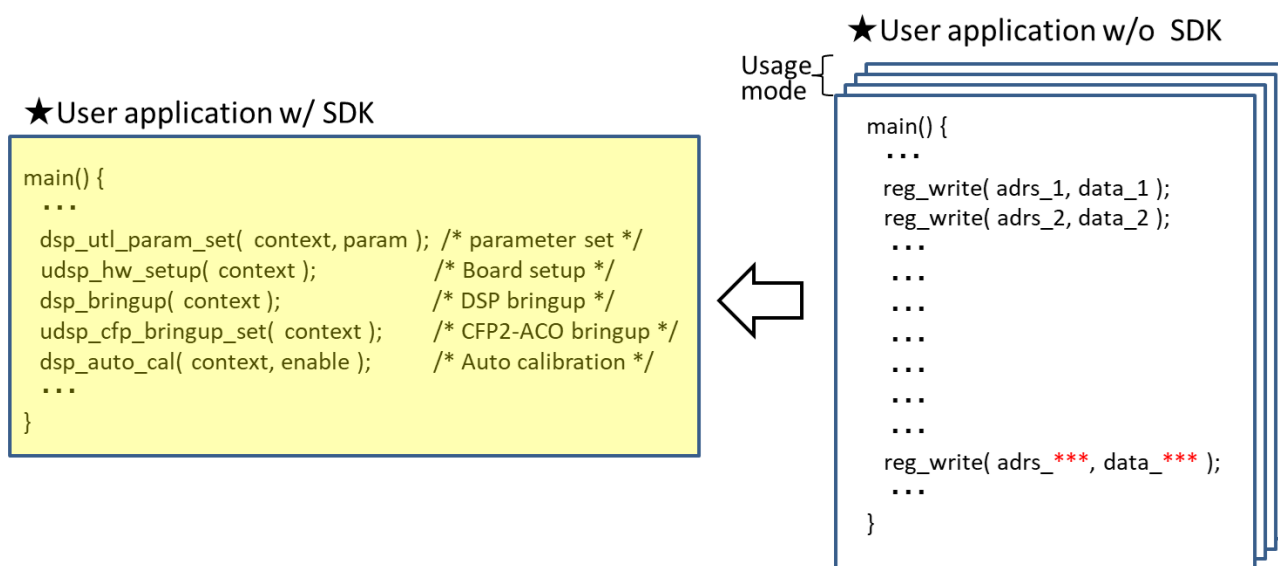


図 2.9 SDK による DSP ASIC の Bring-up

うになった [61]。この背景は、Gen3 より以前の DSP ASIC は伝送モードを設定する際に数百～千ものレジスタアクセスを行う必要があり、上位のアプリケーション側から DSP ASIC のモード変更ができず、ホワイトボックスのような水平分業型のアーキテクチャに対応する際の障壁になっていたことによる。図 2.9 の右側は DSP を Bring-up する際のレジスタアクセスのイメージを示しており、各伝送モードごとに膨大な数の異なるレジスタ群を DSP ASIC に設定する必要があった。筆者らは NTT エレクトロニクス（現 NTT イノベティブデバイス）と協力し、DSP ASIC 用の SDK の設計・開発を推進した。SDK によって設定が数行程度とシンプルになり、ソフトウェアエンジニアが手軽に DSP ASIC を制御して新機能を具備しやすい環境が整った。

図 2.10 は CFP2-ACO と DSP ASIC 間の ACO 接続を示す。DRV MOD や ICR 等の光コンポーネントを搭載

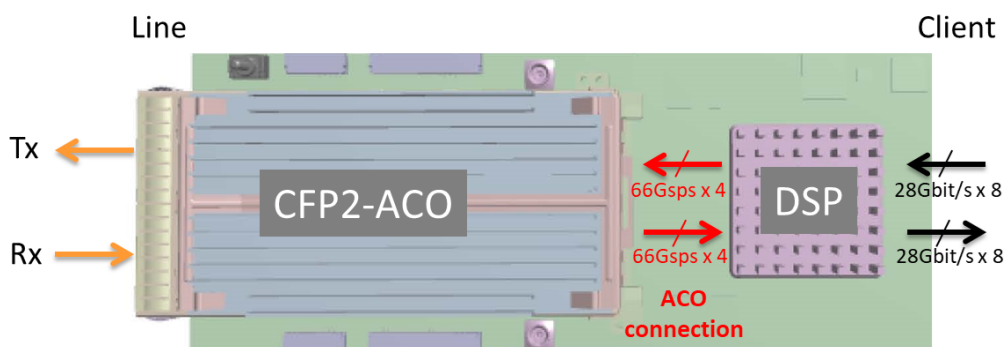


図 2.10 CFP2-ACO と DSP ASIC 間の ACO 接続

した CFP2-ACO と、4ch DAC/ADC を搭載した DSP ASIC 間は、Tx と Rx についてそれぞれ4レーン (XI, XQ,

YI, YQ) の 66 Gbit/s の高速アナログ信号で接続される。アナログ接続であるため、DSP ASIC にてピコ秒オーダーで Skew を補償する必要があるが [62]、Skew の値は CFP2-ACO のベンダ・型番ごとに異なるため、マルチベンダ対応するためにはこれを自動的に最適化する Auto calibration 機能が必要となる\*<sup>9</sup>。この最適化機能は ACO 接続特有の機能であるため、上位アプリケーションには見せずにハードに近い TAI レイヤより下で実行するよう、SDK 内に配置した (図 2.9 左の上から 5 番目のコマンドである Auto Calibration)。

提案する Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャを適用することで、複雑なデジタルコヒーレント実装方式の違いを TAI とそのライブラリで隠蔽し、ハードウェアとソフトウェアへの開発項目の影響を最小限に抑えて効率の良い収用を可能とする。

## 2.2.2 OSS 活用を促進する Linux-based プラットフォーム実装

この節では、2 節の図 2.5 中に示した Switchponder Manager 部分について解説する。

光伝送ネットワークに OSS 技術を組み込むことで、Zero Touch Provisioning(ZTP) 等の高度な自動運用が可能になる。また、OSS 技術を TAI などのハードウェア抽象化レイヤと組み合わせることで、ハードウェアに依存しないソフトウェアを構築することができ、柔軟な運用が可能になる。この考え方を基本として、TIP OOPT ではオープンソース NOS である Goldstone の開発\*<sup>10</sup>を進めてきた [65]。Goldstone は、ほとんどのソフトウェアコンポーネントで広く使われている OSS を実装し、プロプライエタリな実装を減らすことで、DC インフラやクラウド空間で使われているソフトウェアとの互換性を向上させた。また、従来のネットワーク運用で用いられていた管理手法にも対応しており、DC インフラ型の運用手法へのスムーズな移行を可能にしている。図 2.11 に Goldstone のアーキテクチャと主要なソフトウェア・コンポーネントを示す。Goldstone は、本格的な NOS の基盤として設計され、柔軟なビルドシステムと幅広いホワイトボックスプラットフォームをサポートしている Open Network Linux (ONL) をベース Linux ディストリビューションとして使用している。K3s は、コンテナオーケストレーションのデファクトスタンダードである Kubernetes の軽量ディストリビューションであり、Rancher によって開発された OSS である。K3s を利用することで、CPU リソースが豊富でない光送受信装置のホストボード上でも Kubernetes を容易に実行することができる。Goldstone では K3s を利用して、ほぼすべてのアプリケーションをコンテナとして実装している。コンテナを利用することで、ソフトウェア開発者はアプリケーション間の依存ライブラリの競合を考慮することなく、各アプリケーションを疎結合にすることができる。さらに、各コンテナの権限を制御することでセキュリティの高い高度な運用が可能になる。K3s 上で実行されるアプリケーションは 2 種類ある。1 つはハードウェアを制御するコンポーネント群、もう 1 つは上位コントローラーやオペレーターのための管理コンポーネント群である。それぞれのア

\*<sup>9</sup> TRx の高精度なキャリブレーションを行うアルゴリズムについては本論文の対象としていない。これらの研究は文献 [63] 等で詳細に議論されている。

\*<sup>10</sup> Goldstone のアーキテクチャ提案と実装については、そのほとんどが TIP の OOPT NOS の Co-lead を務めた石田渉氏によってなされ、当時石田氏が在籍していた NTT イノベティブデバイスから報道発表がなされている [64]。

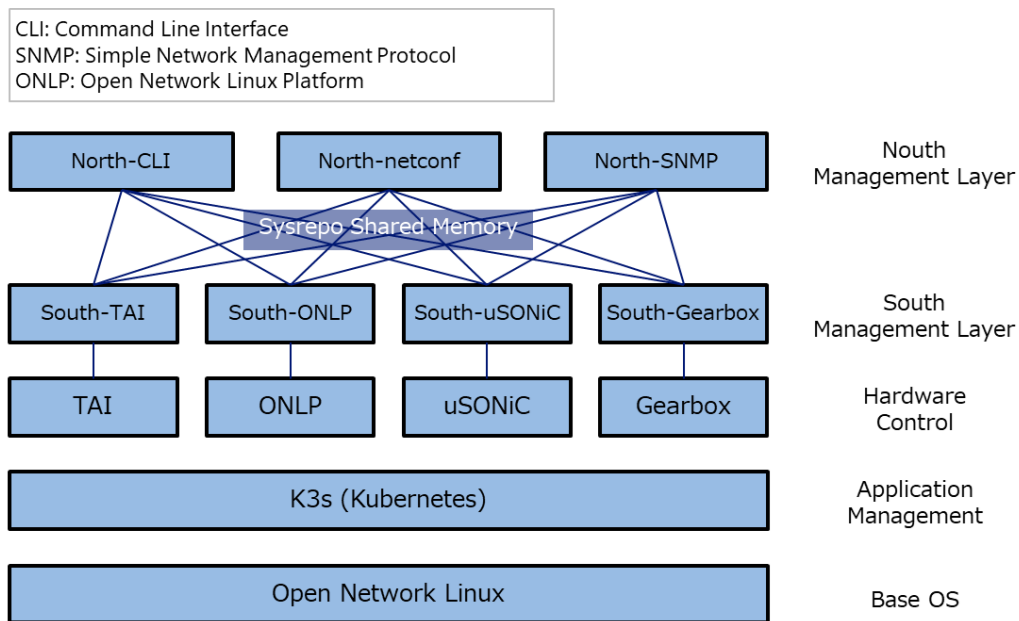


図 2.11 Goldstone のアーキテクチャ

アプリケーションについて以下に説明する。

#### ■2.2.2.1 ハードウェア制御のコンポーネント

コヒーレントモジュール・Switch ASIC・Gearbox 等のネットワークコンポーネントと、温度センサ・ファンなどの周辺機器はすべて、トランスポートシステム上で制御しなければならないハードウェアである。Switchponder の場合、オペレーターは Switch ASIC を制御する必要があり、それらを制御するための様々な OSS コンポーネントがすでに存在しており、Goldstone はそれらを統合して全体として動作するようにしている。Goldstone は、コヒーレントモジュールには TAI を、周辺機器のハードウェア制御コンポーネントとして ONL が提供するプラットフォーム API である Open Network Linux Platform (ONLP)[66] を使用している。Switch ASIC の制御に使用されている  $\mu$  SONiC は、Microsoft の NOS である SONiC から、SONiC の Switch ASIC を制御するコンポーネントのみを抽出し、Kubernetes 上に容易に実装できるようにコンテナ化した軽量パッケージである。なお、Switch ASIC の制御部は必要に応じて交換可能であり、代わりに DANOS [67] や Stratum [68] などの他のコンポーネントを使用することもできる。Muxponder の場合、オペレーターは Gearbox を制御する必要がある。Gearbox 制御部は他の Hardware Control と同様にコンテナとして実装可能で、適用するハードウェアによって Gearbox 制御部か、uSONiC 等の Switch ASIC 制御部を選択して起動する。このように各制御部をコンテナとして疎結合にすることで既存の開発部分を再利用でき、新しいハードウェアに最小限の開発規模で対応できる。

提案する Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャは、2.2.1.3 節～本節に示した方式により、ハードウェアとソフトウェアが分離され、コンテナを活用することで最小の開発規模で様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応できる。

#### ■2.2.2.2 上位コントローラーのためのマネジメントコンポーネント

近年、さまざまな Northbound API が提案されているが、どれもデファクト・スタンダードには至っていない。このような状況を鑑み、Goldstone のアーキテクチャでは Northbound API を提供する各コンポーネントを独立したプロセスとして設計し、新たな Northbound API を提供するコンポーネントを追加する際に既存実装の変更を不要とした。また管理レイヤのコア・コンポーネントとして、YANG モデルに基づく設定と監視のためのライブラリである Sysrepo を採用した。Sysrepo を使用するアプリケーションは、POSIX 共有メモリを介して相互に作用する。管理レイヤは North と South の2つのレイヤに分かれており、North レイヤはユーザーにサービスを提供し、South レイヤはハードウェア制御レイヤと通信する。Goldstone をベースに商用 NOS として開発された NEC NOS には現在、NETCONF API、gNMI、SNMP (Simple Network Management Protocol) を提供するデーモンが実装されている。South レイヤには、TAI/ONLP/SONiC と独立に通信するデーモンが実装されている。このように、サーバー系技術を積極的に活用することで、Goldstone は様々なオペレーターのニーズ・様々なハードウェアに最小限の開発規模で対応することが可能なアーキテクチャとなっている。

#### 2.2.3 自動運用を可能にするモニタリング機能

2.2.1 節の TAI や、2.2.2 節に示した Linux-based のプラットフォームを活用することで、高度でかつ柔軟なモニタリングが可能になる。本節では、提案したアーキテクチャによって可能になるモニタリング機能と、それにより実現できる自動運用について論ずる。図 2.12 はこれらモニタリング機能やツールを用いた、自動運用による OPEX 削減のイメージを示す。オペレーターやベンダ各社が業界横断的に定義・開発した TAI や Goldstone を用いることで、オペレーターはコントローラーを介して Cloud-native な光送受信装置上に実装されているネットワークコンポーネントに直接アクセスし、運用に役立つ様々な情報を得ることができる。例えば TRx (またはプラグインユニット) からは Vendor name・Product number・Version 等の Resource discovery に役立つ情報や、その中に実装されている DSP や光モジュールの Frequency range・Max out power・Baudrate・Modulation format・FEC limit・Max chromatic dispersion compensation 等の情報を入手し、実装されているネットワークコンポーネントの特性・性能に応じた Optical path design が可能となる。またコヒーレントモジュールの場合、光ファイバーの波長分散や偏波モード分散などによって生じる波形歪を、電気回路を使って補正・訂正しているため、これらの処理の結果である Pre-FEC BER・Chromatic dispersion・Polarization dependent loss 等の Fiber parameter を DSP ASIC からモニタすることができる。これらの情報をリアルタイムに監視することで、QoT 推定や不具合箇所特定等に役立てることができる。さらに、3.1.1 節で紹介した DLM のような新しいモニタリング手法が開発された場合、DSP ASIC から DLM 実施のためのデータを抽出する Attribute を TAI に定義し、Goldstone 上に DLM を制御するためのコンテ

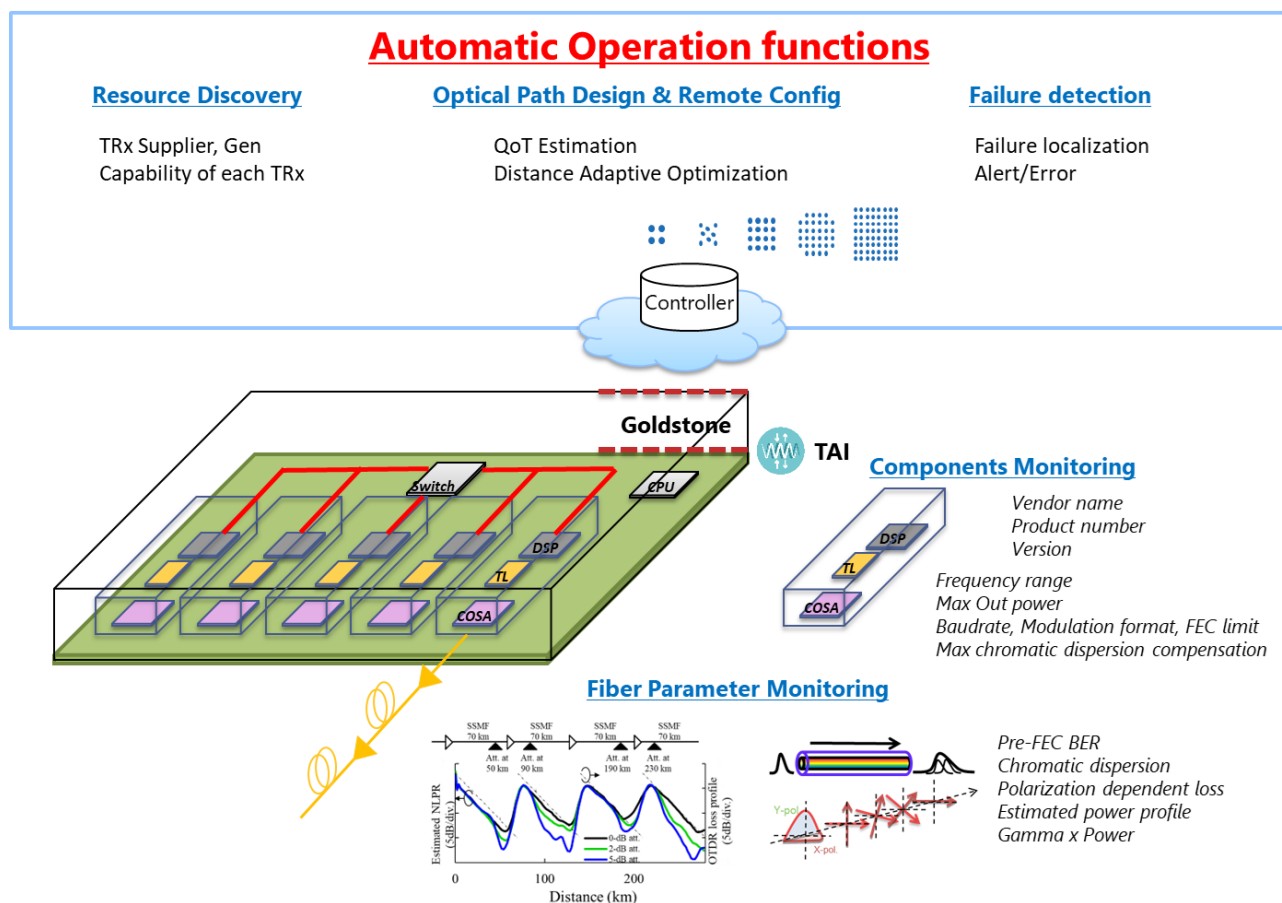


図 2.12 Open Transport Platform による OPEX 削減

ナを実装することで、最新の機能を迅速にオペレーションに活かすことができる。

このように、提案する Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャは、2.2.1.3 節～本節に示した方式により、DCX オペレーターによるハードウェアコンポーネントのモニタ・制御が容易で、自動制御やデジタルツイン等の新しい技術を適用しやすい。

## 2.3 提案したアーキテクチャの利点と実績

この節では、2.2 節で提案した Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャの利点と、パートナーベンダと協力して実装し標準化を推進した実績を示す。

### 2.3.1 TAI のもたらす利点と実績

2.1.1.1 節で論じたように、ハードウェアとソフトウェアが密結合したアーキテクチャの場合、オペレーターはベンダ数と装置種別の積の分の開発規模が必要で、オペレーションシステムの開発・技術習得もベンダ数の分だけ実施する必要があった。TAI とそのアーキテクチャを定義することで、2.2.1 節の図 2.8 に示したように、NOS ベンダにとってのハードウェアの複雑さを隠蔽することが可能となり、機器の互換性と自由度を大幅に向上させることができる。オペレーターはハードウェアやソフトウェアを個別に選択できるなど、選択の自由度が増し、開発・運用効率を

向上できる。また 2.3.3 節に後述するように、TAI を活用することで遠隔に設置された光送受信装置に高度な運用を施すことができる。ハードウェアベンダは、ハードウェア抽象化 IF の共通セットを定義することで、自ら開発の冗長性を取り除くことができる。また、競合他社に開示することなく、独自の差別化技術を TAI のオプションとして実装することもできる。

筆者らはパートナーベンダと協力し、OFC2019 にてマルチベンダ相互接続デモを実施した。図 2.13 はデモ構成を、

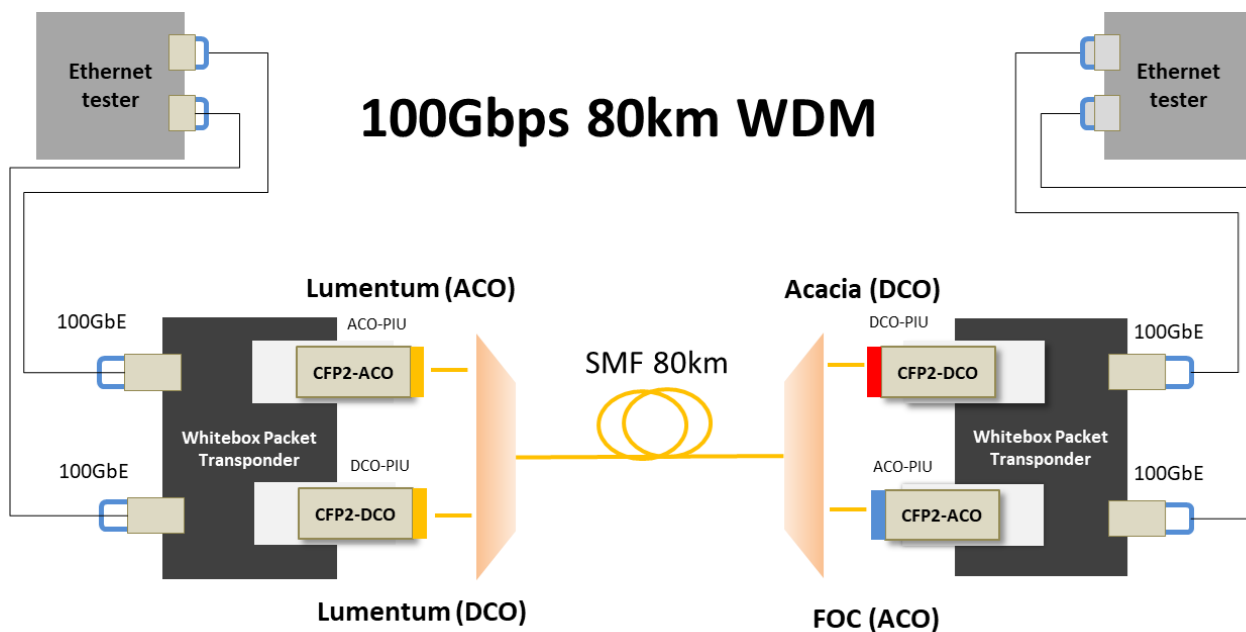


図 2.13 マルチベンダ相互接続デモの構成

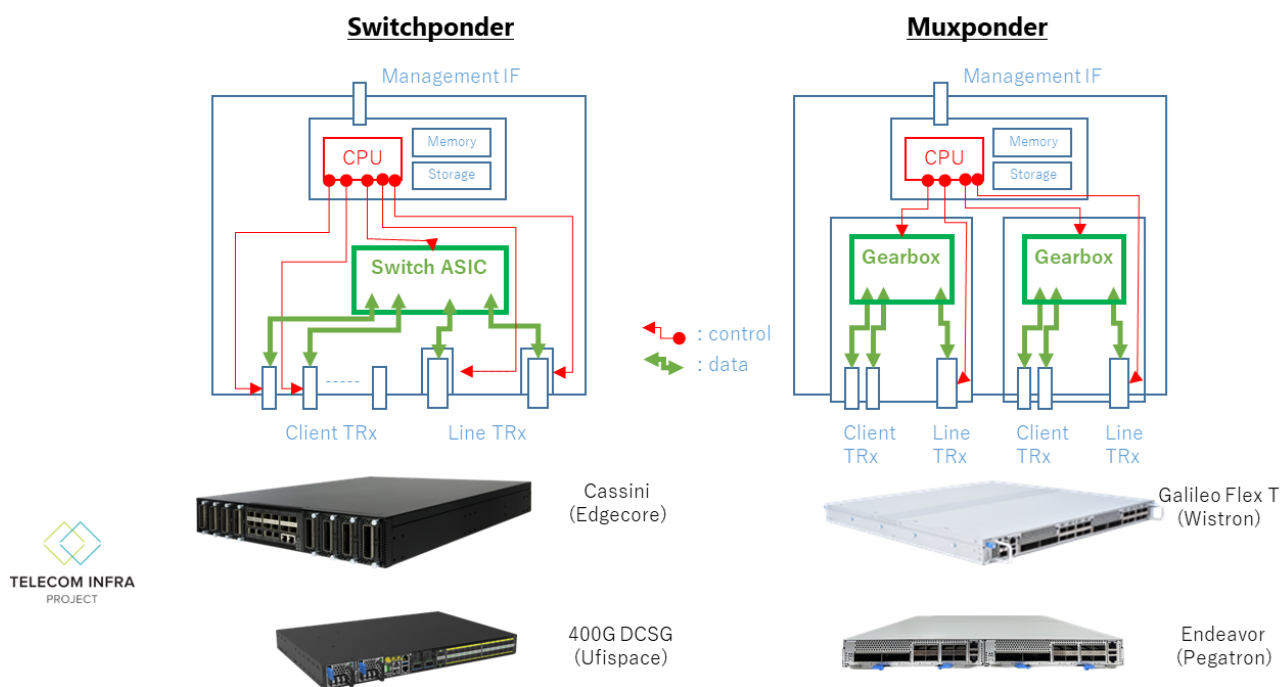


図 2.14 展示の様子

図 2.14 は展示の様子を示す。コヒーレントモジュールを実装可能な商用のホワイトボックスパケットトランスポン

ダ (Tomahawk+ ASIC を搭載した Switchponder) である Cassini (6.4 節参照) に TAI と Goldstone を実装し、4 台のコヒーレント TRx (Acacia Communications CFP2-DCO・富士通オプティカルコンポーネンツ CFP2-ACO・Lumentum CFP2-ACO および CFP2-DCO) を 80 km のシングルモードファイバーで接続し、100G DP-QPSK SC-FEC でエラーフリー動作を確認した。

続いて筆者らは、Switchponder 向けに設計したコヒーレント技術を実装できるホワイトボックスのアーキテクチャを Muxponder に適用した。ここで、我々がパートナー各社と共に提案してきた、オープンハードウェアをベースと



した光送受信装置アーキテクチャ (図 2.15 参照) を用いて、Switchponder と Muxponder のハードウェアアーキテクチャの違いを説明する。両方ともにサーバーベースの CPU・Memory・Storage を搭載した Whitebox のアーキテクチャである点は共通だが、Switchponder が Ethernet ASIC によって TRx を多重しているのに対して、Muxponder では L1 の多重化 ASIC である Gearbox を使って多重化している点が異なる。Gearbox は (パケット多重ではなく) 時分割多重によってクライアント側 TRx からの電気信号を Mux し、ライン側 TRx からコヒーレントの光信号として出力する。また Gearbox はキャリア向けの監視機能を多々備えており、この LSI を搭載することで OTN 等のサービスも提供可能となる<sup>\*11</sup>。図 2.15 に示したハードウェアアーキテクチャと、2.2.2 に示したコンテナを活用した Goldstone のアーキテクチャにより、一つのアーキテクチャでハードウェアとソフトウェアへの影響を最小限に抑えながら、キャリア系コンポーネントと DC クラウド系コンポーネントを効率よく収容できることを実証した。

また TIP Summit 2019 では、TAI を実装したホワイトボックスパケットトランスポンダ上にさまざまな NOS を

<sup>\*11</sup> Muxponder については、TIP OOPT において Phoenix プロジェクトとして他キャリア・パートナーベンダと共に標準化・普及活動を推進した。詳細は付録 6.6 節を参照。



図 2.16 TIP summit 2019 での相互接続デモンストレーション

実装して相互接続デモを行った。図 2.16 の左は Wistron のハードウェアである Galileo に Goldstone NOS を、中央は Cassini 上に富士通の NOS-F を、右は Cassini 上に IPinfusion の OcNOS を実装して、それらのデータ信号を相互接続した様子を示す<sup>\*12</sup>。これらの相互接続デモを通して、2.1.1 節に示した様々な NOS に柔軟に対応できることを実証した。

### 2.3.2 OSS を活用したモニター・制御

図 2.17 は、TIP OOPT にて仕様化された 400 Gbit/s Disaggregated Muxponder ”Phoenix” [69]<sup>\*13</sup>の各コヒーレントモジュールを OSS の監視ツールである ZABBIX を使ってモニタリングした様子を示す（OFC 2023 に展示）。ハードウェアは 6.4 節の図 2.15 に示した、Gearbox と 400G CFP2-DCO を搭載した Wistron の Galileo Flex T を活用し、2.2.1 節の TAI と 2.2.2 節の Goldstone をベースに開発された NEC NOS を適用した。このデモは 2.2.3 節に示したモニタリング手法を実装したもので、筆者らはパートナー各社と協力して NEC NOS 上に ZABBIX を使った新しいモニタ機能をコンテナとして実装し、このアプリケーションが TAI を通してコヒーレントモジュールからデータを収集した結果をリアルタイムに可視化した。可視化したパラメーターは、光送受信装置以外の CPE でも一般的に取得する消費電力・温度・トラフィック量・CPU・メモリに加えて、Pre-FEC BER・光周波数・Modulation format といった光送受信装置ならではのパラメータを差異無くモニタしている。また画面表示ツールには、OSS として広く普及している Grafana を利用した。

このデモを通じて、2.2.3 節に示した「自動運用を可能とするモニタリング機能」を実証し、2.1.1 節に示した「OSS を用いたハードウェアコンポーネントのモニタ・制御が容易で、自動制御やデジタルツイン等の新しい技術を適用し

<sup>\*12</sup> Cassini は、ここに示したデモンストレーション以外にも多くのトライアルで活用されている。Cassini のトライアルや商用化の状況については、付録 6.5 節に示す。

<sup>\*13</sup> Phoenix の詳細は付録 6.6 節を参照。

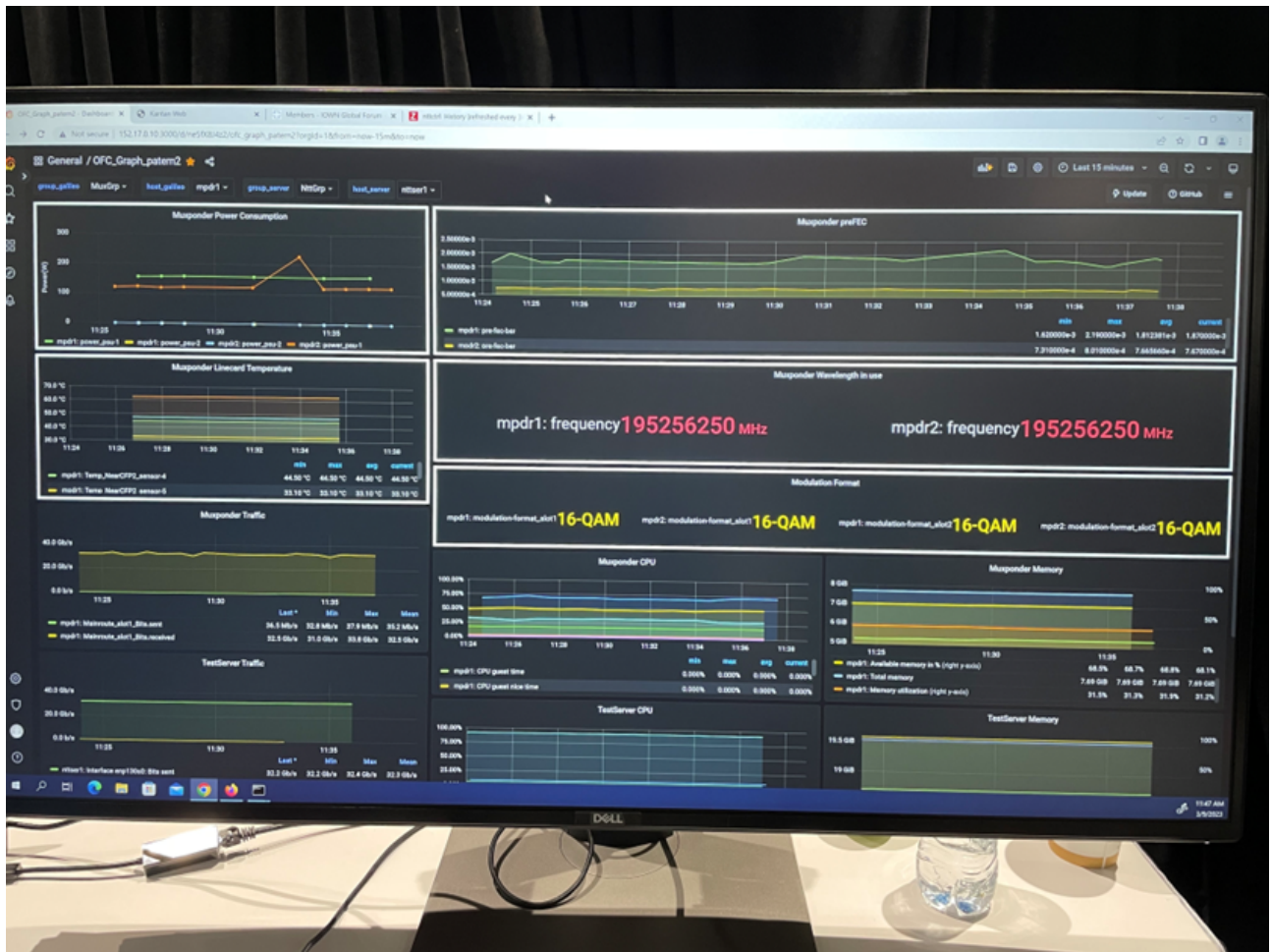


図 2.17 ZABBIX によるモニタリングのデモンストレーション (OFC 2023)

やすいこと」の要件について、オペレーター主導で実現可能であることを示した。

### 2.3.3 ユーザー機器監視・制御実験

2.1.1.2 節と 2.1.1.3 節に示したように、垂直統合型のアーキテクチャで多種多様な TRx を監視・制御する際には、NOS と TRx の仕様の不一致による事故が発生する可能性があり、またベンダ独自の故障検査や調査機能を利用することができないといった課題があった。この節では、2.2 節に示した Cloud-native なアーキテクチャを活用して、既存のオープン IF や MSA を変更することなく、短時間で遠隔に設置されたユーザー TRx の監視・制御を可能にする実験を行った結果を示す。

図 2.18 は、Cloud-native なアーキテクチャを活用した User Muxponder 内の TRx 監視・制御を示す。ハードウェアは Phoenix [69] を用い、TRx は OpenROADM MSA 仕様 [25] に基づくベンダ 2 社の CFP2-DCO を使用した (図 2.18 の TRx A と TRx B)。装置ソフトウェアには、TIP OOPT の Goldstone NOS [65] をベースに開発された NEC NOS を使用した。Gearbox Controller と Coherent optics controller の両機能は NOS 上にコンテナとして実装されている。本実験では、User Muxponder に初めからインストールされていたコンテナ群 (青色) に加え、キャリアの Coherent optics controller と Carrier agent (赤色) を後からコンテナとして追加し、User Muxponder の制御

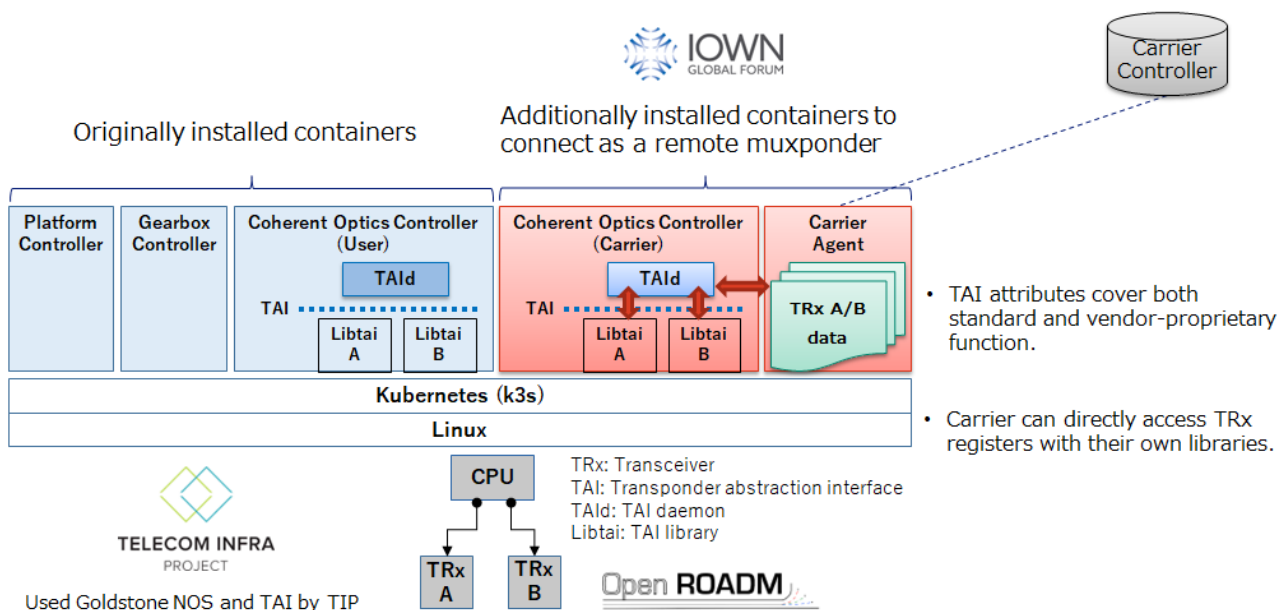


図 2.18 コンテナベースの装置ソフトウェアアーキテクチャの例

をキャリアが実施するユースケースを想定した。このユースケースは IOWN Global Forum の Open All-Photonics Network Functional Architecture [70] に記述されているリモート・トランスポンダ構成をベースにしている。

2.2 節で紹介した TAI アーキテクチャは、様々な TRx フォームファクターやベンダ間の違いを隠蔽する。TAI アーキテクチャは、これらの違いを吸収するオープンな IF である TAI とそのライブラリである libtai、および TRx A/B をフォームファクターの種類やベンダの種類に関係なく監視し制御する TAId から構成されている。本実験では TRx A/B 用に Libtai を開発し、共通パラメーター（BER・変調フォーマット・ボーレート）を用いて各種デバイス間のモード最適化を行った（最適化の手順は 3.3 節に後述）。TAI は、標準的な機能と同様、ベンダ独自の機能を使用するための属性を追加できるように設計されている。キャリアはこれらのコンテナをリモート制御し、TAI とそのライブラリを使ってユーザーの TRx レジスタに直接アクセスし、DCX の安定運用・堅牢性確保を実現できる。例えば、CFP MSA はモジュールベンダ用にプライベートレジスタを定義しており [18]、ベンダはこれを使用して出荷前検査や予期せぬ故障の根本原因調査を行っている。キャリア・コントローラーがコンテナでこの機能を利用できれば、この情報を使用してより高度な根本原因調査を行うことができる。さらに、コンテナとして「実行可能なバイナリ」を使えば、キャリアとユーザーが互いにソースコードを開示することなく、即座にファームウェアのアップデートなどの運用管理を実施できる<sup>\*14</sup>。

図 2.19 は、キャリアが User Muxponder を遠隔から制御する場合の例を示している。User Muxponder は、DCX に接続すると、キャリア・コントローラーから必要なコンテナを取得してインストールし、ベンダ名・ファームウェアバージョン・パラメーターなどの TRx データをキャリア・コントローラーに送信する。次に、キャリアコントローラーは TRx が認証されているかどうかを確認し、TRx が認証済みの場合は、User Muxponder に TRx の特性に関

<sup>\*14</sup> [71] では、マルチベンダ環境にてコヒーレント・モジュールの自動ファームウェア・アップグレードを実証した結果を報告している。

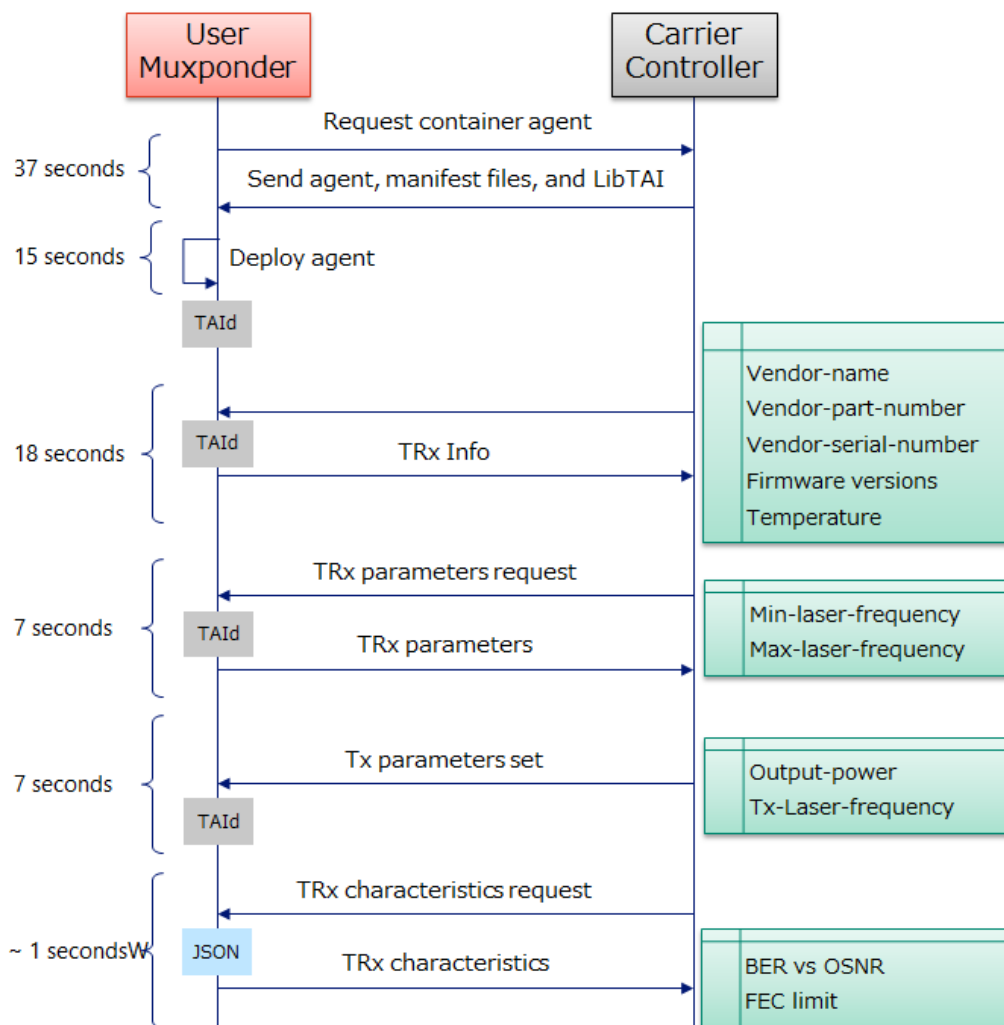


図 2.19 User Muxponder の TRx を監視・制御するシーケンスの例

する情報を要求する<sup>\*15</sup>。

ベンダが TRx 特性に関するデータを提供する場合、いくつかの方法が考えられる。例えば一部の TRx ベンダは、BER vs OSNR 曲線やその他の特性情報を TRx 内のレジスタに格納して出荷している。本実験では、これらの特性を JSON ファイルとして User Muxponder に保存した。図 2.19 に示すシーケンスを設計・実装して試験を行ったところ、コンテナ起動も含めた全シーケンスを 90 秒以内で完了することができた。

この仕組みによって、キャリアは遠隔にあるユーザー TRx に対して自身の TRx 制御機能をコンテナを使って適用でき、イレギュラーな接続が起きないように自身で管理することで、セキュリティと堅牢性を担保することが可能となった。

User Muxponder を制御する際、キャリアエッジからデータ信号用のファイバーだけを用いて制御する実験も実施している [72]。図 2.20 は User Muxponder のリモート制御実験の様子を示す。米国 Duke 大のテストベッドにある 27.4 km のフィールドファイバー（うち架空区間 2.29 km を含む、詳細は 4.4 を参照）を活用し、Muxponder

<sup>\*15</sup> 一般に TRx 特性は TRx ベンダの秘匿情報とされている。ここでは、キャリアと TRx ベンダの間で機密保持契約が締結されているものと仮定した [14]。

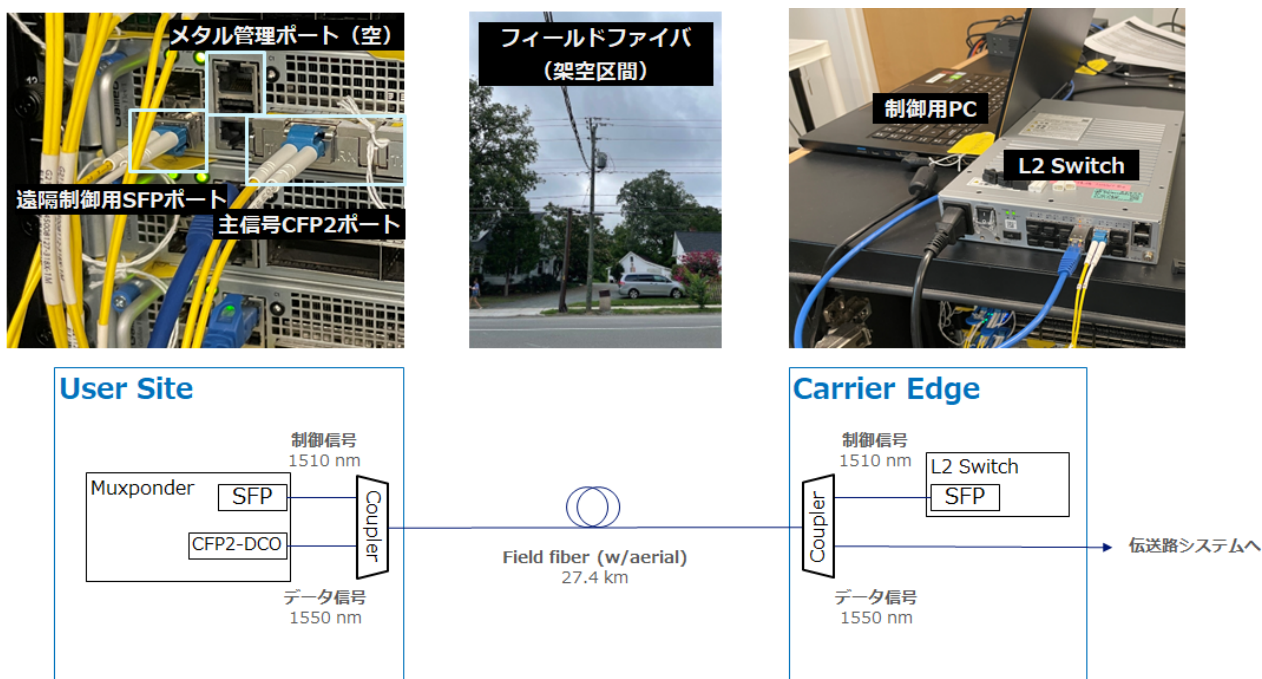


図 2.20 User Muxponder のリモート制御実験

に挿入した CFP2-DCO のデータ信号 (1550 nm) に、同じく Muxponder に挿入した Small Form-factor Pluggable (SFP) からのギガビットイーサネットの制御信号 (1510 nm) を波長多重して伝送した。制御信号はキャリアエッジにて L2 Switch と制御用 PC で受信し、ユーザーサイトにある Muxponder を制御した。図 2.19 と同様のシーケンスで、問題なく制御できることを確認し、本方式によって現行の機器でリモート制御が可能なことを示した。

上記実験により、DCX オペレーターによる遠隔からのユーザー機器の監視・制御が、アップデートや故障切り分けなどの高度なレベルで可能であることを実証し、2.2 節で提案した Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャが、2.1.1 節に示した「ユーザービルに光送受信装置を設置・運用」の要件を満たすことを示した。

## 2.4 まとめ

コンピューティングとネットワーキングが融合した新しいインフラ「DCX」を実現するためには、DC のソフトウェア技術と光ネットワークのハードウェア技術を組み合わせた新しいネットワーク・アーキテクチャが必要である。本章では、DC で用いられる運用管理方式と親和性の高い光送受信装置の制御アーキテクチャについて提案・実装し、フィールド実証などの実験結果を通して 1.2.1 節の光送受信装置に関する到達目標を達成したことを示した。

異なったハードウェアコンポーネントを搭載した光送受信装置を用いて提供する要件については、2.2.1 節にて、複雑なデジタルコヒーレント実装方式の違いを TAI とそのライブラリで隠蔽し、ハードウェアとソフトウェアへの開発項目の影響を最小限に抑えて効率の良い収用を可能とすることを示した。続いて 2.3.1 節にて、4 台の多様なマルチベンダのコヒーレント TRx 間を相互接続したデモを実施し、さらに同アーキテクチャを Switchponder から Muxponder に適用することで、一つのアーキテクチャでハードウェアとソフトウェアへの影響を最小限に抑えなが

ら、キャリア系コンポーネントと DC クラウド系コンポーネントを効率よく収容できることを実証した。

様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応でき、将来技術をオペレーター主導で追加可能とする要件については、2.2.2 節にて、各制御部をコンテナとして疎結合にすることで既存の開発部分を再利用でき、新しいハードウェアに最小限の開発で対応できることと、サーバー系技術を積極的に活用することで、様々なオペレーターのニーズに対応できることを示した。また 2.2.3 節にて、DCX オペレーターによるハードウェアコンポーネントのモニタ・制御が容易で、自動制御やデジタルツイン等の新しい技術を適用しやすいことを示した。続いて 2.3.1 節にて、異種ハードウェア上に異なる 3 つの NOS を実装した相互接続デモと、汎用的な OSS を用いたコンポーネントモニタ・制御デモを通して、提案アーキテクチャを使って要件を満たすことが可能なことを実証した。

ユーザービルに光送受信装置を設置・運用を可能とする要件については、2.3.3 節にて、サーバー技術であるコンテナを活用して User Muxponder の TRx を監視・制御する方式を設計・実装し、この方式がアップデートや故障切り分けなどの高度なレベルの運用に対応可能であること、キャリアが遠隔にあるユーザー TRx に対してイレギュラーな接続が起きないように自身で管理できるようにすることで、セキュリティと堅牢性を担保可能であることを実証した。

また、ユーザー機器に DCX オペレーターのエージェントを送信し、起動から監視制御に至る一連のシーケンスを 90 秒で実施できることを Duke 大のフィールドファイバーを用いて確認し、到達目標 10 分以内を達成した。

### 3 伝送路の QoT に応じた自動光波長パス設計技術

#### 3.1 はじめに

本章では、ユーザーの任意拠点に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の TRx を、ユーザーアクセス経路で遠隔から制御・監視・最適化するコントローラー技術について論じ、フィールド実証などの実験結果を通して 1.2.1 節のコントローラーに関する目標（以下）を達成したことを示す。

- ユーザー拠点に配置されるデジタルコヒーレントトランシーバーの伝送パラメーターを遠隔から設計・最適化
  - － ユーザー TRx 特性を参照したプロビジョニング・リルート
  - － 任意の多対多拠点間の多様なトポロジーに対応
  - － 距離や QoT に応じた最適モードの自動選択
- 数値目標：オンデマンドな WDM プロビジョニングを人手を介さずに自動的に実施できることを、フィールドファイバーを用いて以下の条件で実証
  - － WDM プロビジョニングに割り当て可能な時間 10 分以内
  - － WDM プロビジョニングに起因する変動値をシステムの変動値と同じ桁に収める

はじめに、3.1.1 節にて関連研究を通してコントローラーの現状を示し、本研究が目指すコントローラーの要件を分析する。続いて 3.2 節にてユーザーとキャリアが協調した光 WDM パス設計を実現するためのアーキテクチャとプロトコルを、3.3 節で全ての可能な E2E 光パスの GSNR を高精度で高速に推定するアプローチを提案する。3.4 節では、実際の E2E GSNR 測定値に対して、本手法の推定誤差、波長依存性とデバイスの波長割り当てによるペナルティを評価・比較する。3.5 節では、各リンクの品質推定、E2E 光パスマージン設計、およびフィールドファイバーを含む実験セットアップを使用した User Muxponder のリモートコンフィギュレーションのための時間測定結果を示す。3.6 節では、精度の向上とシステムの柔軟性の拡大に向けた今後の課題について論じ、3.7 節で本章の結論を述べる。

##### 3.1.1 コントローラーの現状と要件

1.1.8 節に述べたように、本研究では低遅延・拡張性・信頼性・柔軟性を同時に満たし、遠隔に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の機器を接続可能とし、オペレーター主導で自動運用などの新機能を追加可能な DCX インフラアーキテクチャの実現を目指す。本節ではコントローラーが持つべき機能に注目し、ユーザー拠点に配置されるデジタルコヒーレントトランシーバーの伝送パラメーターを遠隔から設計・最適化する技術の関連研究を紹介した後、本研究が目指す DCX を実現するためのコントローラーの要件を分析する。

### ■3.1.1.1 伝送路設計に関する関連研究

はじめに、DCX サービスを提供するコントローラーにとって重要な伝送路設計、特に WDM でのプロビジョニングに関連するこれまでの研究を紹介する。WDM プロビジョニングのための伝送モード最適化アプローチについては Kaevai らが多くの研究を発表している [15, 73, 74]。彼女らは、Optical Spectrum as a Service (OSaaS) と呼ばれる、シングルまたはマルチドメイン光ネットワークのエンドポイント間を接続する透過的な光パスで QoT プローブチャンネルを使用し、WDM をプロビジョニングするためのアプローチを提案した。図 3.1 は OSaaS の構成例を示す。OSaaS は、WDM ネットワークにおける未使用の光スペクトルを有効利用することを主眼としており、キャリア等が光スペクトルをサービスとして提供するユースケースを想定している。彼女らは、OSaaS ユーザーの TRx 間

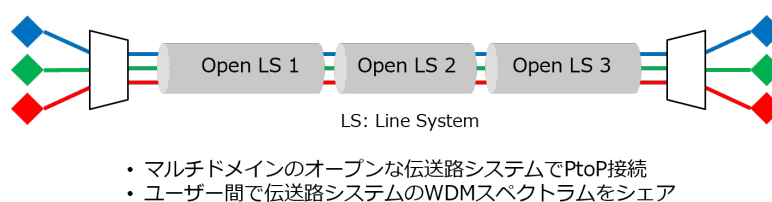


図 3.1 OSaaS の構成

の E2E における GSNR を推定し [15, 73]、E2E ルートを構成する各リンクの推定 GSNR を使用して E2E の GSNR を推定するアプローチを提案した [74]。ただしいずれの場合も、運用中の信号光と同じ波長のプローブチャンネルを用いて波長ごとに GSNR を推定するため、多波長多重伝送の場合はプロビジョニングに時間を要する。また OSaaS が Point to Point の接続であるのに対し、DCX は 2 次元平面上に展開される多対多の接続であるため、光パス経路や波長の組み合わせが多く、[74] のモデルよりも複雑なモデルとなっている。OSaaS は、WDM パスを設定する際にユーザーとキャリアが協調するためのアーキテクチャを提供していない\*16。また、これらの論文では単一ベンダの光伝送装置が適用されており、DCX のように各接続点に設置された様々な光周波数帯域・変調器・変調方式を持つ光伝受信装置間の光パス設定に関する検討や実験は行われていない。他にも、ユーザーとキャリア間など、管理の境界を越えて光パスを確立する研究も進められている (GMPLS [75]、Alien Wavelength [76])。しかし、これらの研究により各要素技術は存在するものの、DCX サービス実現に必要なアーキテクチャや、対向の TRx 間での Consistency Check・最適なコヒーレントモード選択のためのプロトコルはこれまで研究・フィールド実証されてこなかった。

続いて複数伝送モードについて説明する。図 3.2 はコヒーレント TRx の複数伝送モードの Back-to-back の BER 対 OSNR 特性を示す。点線はエラー関数に基づく各伝送モードの理論値を、実線は TRx で発生する電気ノイズ等の TRx 特性を加味したシミュレーション値を示す。青色・オレンジ色・緑色・黄色はそれぞれ DP-QPSK 32 GBaud (100 Gbit/s)・DP-QPSK 64 GBaud (200 Gbit/s)・DP-16QAM 32 GBaud (200 Gbit/s)・DP-16QAM 64 GBaud (400 Gbit/s) を示す。伝送距離は FEC の性能 (FEC limit) にも依存する。グレーの横線は Open ROADM にて

\*16 ユーザーとキャリアが協調することによる利点は 3.2 にて後述する。

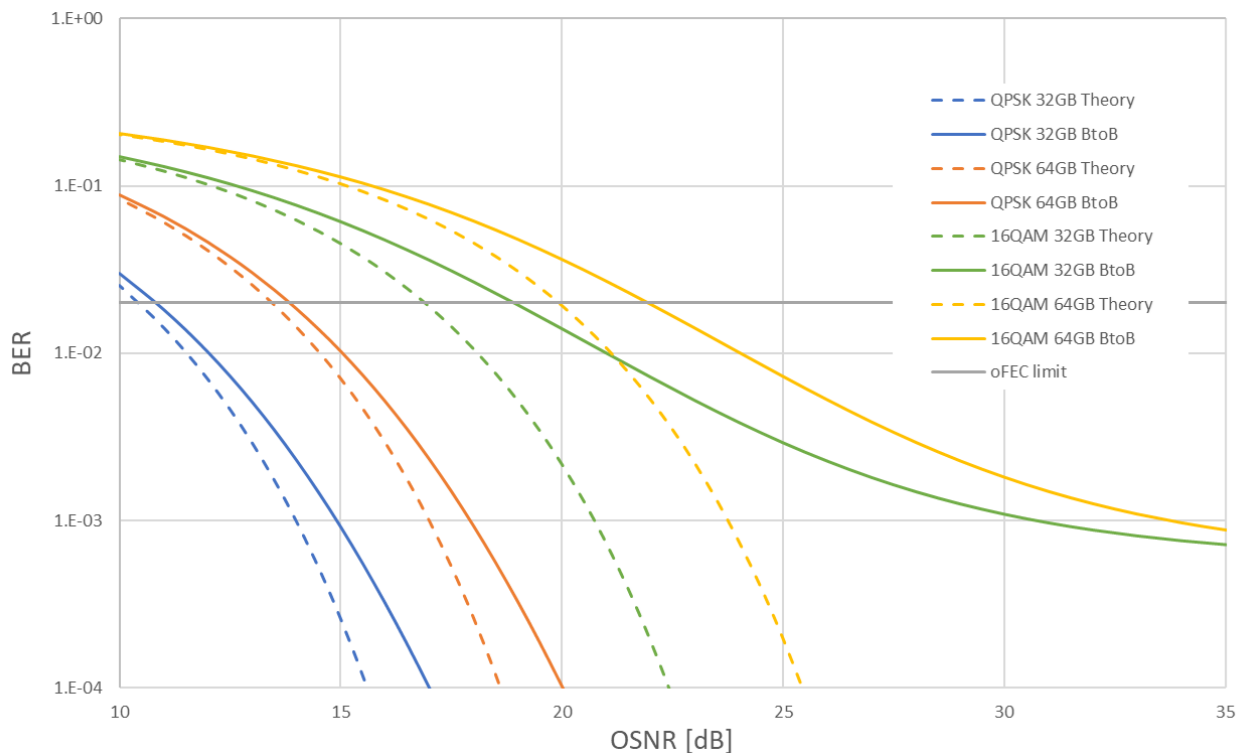


図 3.2 コヒーレント TRx の複数伝送モード

規定された oFEC の FEC limit ( $2 \times 10^{-2}$ ) を示しており、この線を越えると Post FEC でエラーフリーを達成できない。伝送モードにより必要とされる光周波数リソースや伝送路 QoT が異なる。例えば DP-QPSK の場合、DP-16QAM に比べて周波数利用効率は半分程度しかないが、OSNR 耐性に優れ、より長距離の伝送が可能となる。一方 DP-16QAM は DP-QPSK に比べて周波数利用効率が 2 倍程度良いが、OSNR 耐性が低く伝送距離は制限される。なお、図 3.2 では全ての伝送モードについて TRx で発生するノイズを一律 17 dB と仮定して計算したが、商用の TRx 特性はベンダや伝送モードに依存して異なった値を持つ。筆者らは、200 km 以下の伝送距離においてはこの TRx 特性が主要なインペアメントとなることをフィールドで確認し発表してきた [77]。オンデマンドに光 WDM パスを提供するためには、伝送路の QoT (波長依存性含む)・モードごとの TRx 特性・FEC 性能を加味した上で適切なマージンを積み、ユーザー要求や収容効率に応じた最適な伝送モードを自動的に選択する必要があるが、これまでに発表した [77] ではネットワーク・トポロジー、モード最適化の具体的な手順、波長依存性などの WDM による影響、ユーザー TRx 遠隔制御のための装置ソフトウェア・アーキテクチャについては言及しておらず、かつ実験室内での評価結果のみの報告であった。

### ■ 3.1.1.2 従来の伝送路設計の課題と DCX のサービス要件

図 3.3 に DCX の構成例を示す。図中央のグレーの部分に都市型 DC (Urban Data Center: UDC) があり、各 UDC には POP があり、通信事業者が所有するキャリアリンク (Carrier Link: CL) で接続されている。本章ではコ

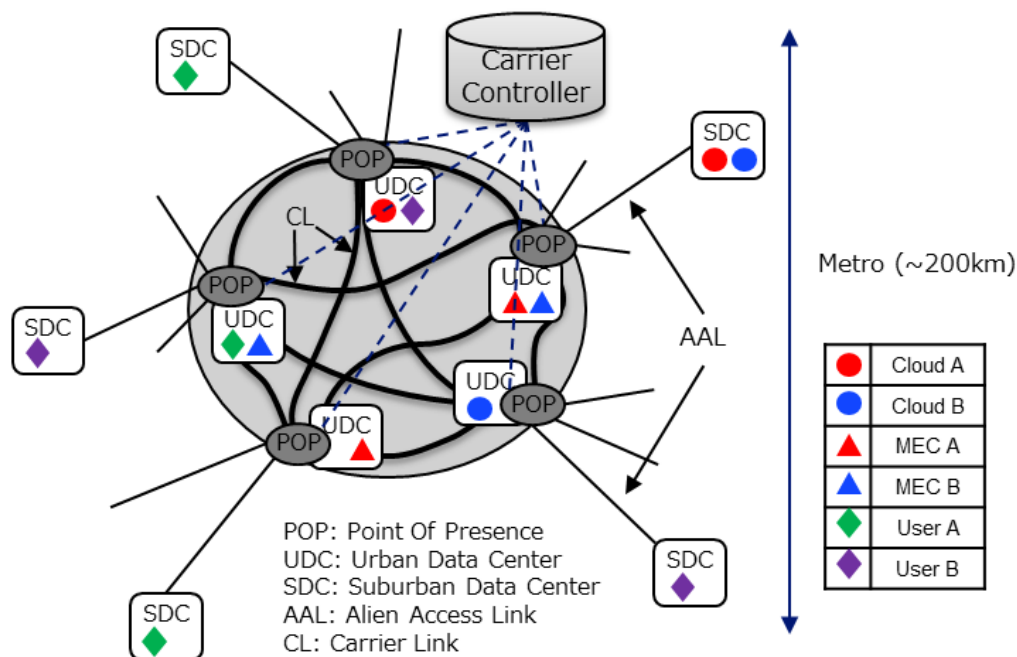


図 3.3 DCX の構成例

ンポーネット・品質・パラメーターが不明なアクセスネットワークを Alien Access Link: AAL と定義し、AAL・キャリアが管理するネットワーク・ユーザー TRx のネットワークモデルを以下のように仮定する。

#### AAL

所有者に関係なく、ユーザーもキャリアもリンクパラメーターを知らないと仮定する。

#### キャリアが管理するネットワーク

任意の光デバイス（アンプ、フィルタなど）を設置可能。ユーザーはリンクパラメーターを知らない。

#### ユーザー TRx

コヒーレント TRx を想定。TRx の特性である、TRx 出力端の OSNR (TxOSNR)、Back-to-back の BER 対 OSNR、および実装された機能を知っているのはユーザーだけとする。使用する経路と波長はあらかじめ与えられているとし、それらの選択方法は本研究の範囲外とする<sup>\*17</sup>。ユーザーとキャリアの間にはあらかじめセキュアなチャンネルが構築されており、それを介して制御情報を交換することができるものとする。認証方式も本研究の範囲外とする。

ユーザー機器は、郊外の DC (Suburban Data Center: SDC) から AAL を経由して UDC の POP に接続し、電気的な変換を行うことなく、遠隔地のクラウド MEC や他のユーザー機器に直接接続することができる。

1.1.6 節でのべたユースケースを実現するためには、DCX のサービス要件として、ユーザーからの時間変化の速い DC 間トラフィック要求にオンデマンドに対応し、ユーザーの TRx の特性に応じた光波長パス設計をする必要があ

<sup>\*17</sup> 経路と波長選択については GMPLS 関連研究や RWA 問題として数多くの研究がすでに発表されている。

る。このためには、ユーザーと DCX オペレーターが協調した光 WDM パス設計を実現可能なアーキテクチャとプロトコルが必要になるが、これを実現する技術はまだ開発されていない。また、DCX はネットワーク構成において従来の DCI と異なり、新たな技術を適用する必要がある。図 3.4 は従来の DCI と DCX との比較を示す。一対一のシ

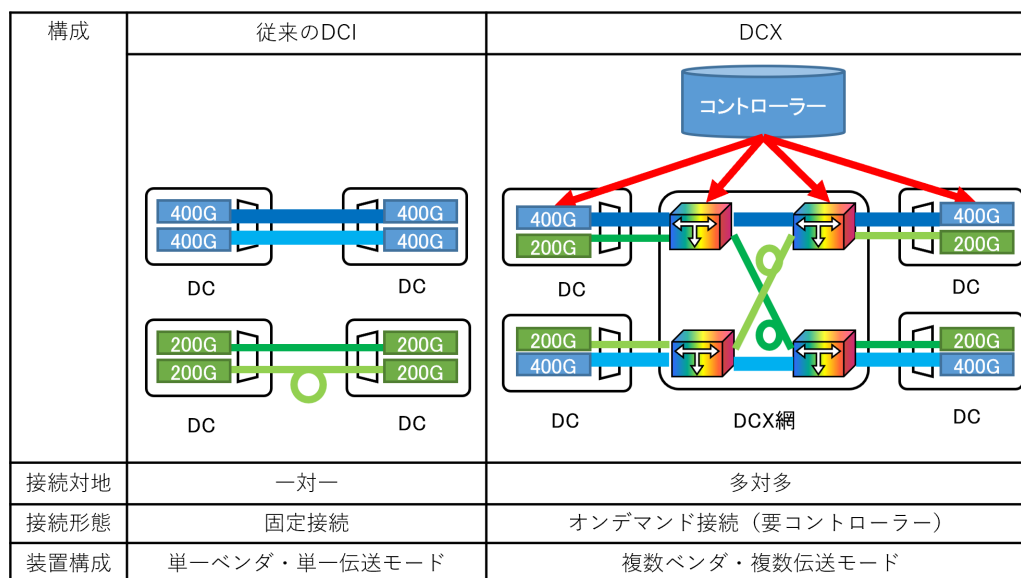


図 3.4 従来の DCI と DCX との比較

ンプルなトポロジーで構成される従来の DCI に対して、DCX は多対多の接続を対象とするため、短時間で効率よく E2E の光パスを設計可能とする技術が必要になる。また、従来の DCI は単一ベンダ・単一伝送モードで装置を構成するのが一般的であったが、DCX は様々なユーザー間での接続を可能にするために、複数ベンダ・複数伝送モードでのトランシーバモデル定義や相互接続を可能とする技術が必要である。これらの要求に対応し、オンデマンドに E2E の光波長パス接続を提供するには、ファイバー伝搬や光ファイバーアンプ・TRx の電気ノイズによる光信号品質の劣化を遠隔から短時間で算出し、装置に設定する技術が必要になる。

上記に示した課題より、ユーザー拠点に配置されるデジタルコヒーレントトランシーバの伝送パラメーターを遠隔から設計・最適化する技術の要件は、以下のようにまとめることができる。

**ユーザー TRx 特性を参照したプロビジョニング・リルートが可能** ユーザーと DCX オペレーターが協調し、キャリアがユーザー TRx 特性を参照して光 WDM パス設計を実現できる仕組みを備えること

**任意の多対多拠点間の多様なトポロジーに対応** 多対多の拠点間において、発生する誤差を小さく抑えたまま短時間で効率よく E2E 光パスを設計可能とすること、ファイバー伝搬や光ファイバーアンプ・光送受信装置のノイズによる光信号品質の劣化を遠隔から短時間で算出し、装置に設定すること

**距離や QoT に応じた最適モードの自動選択** 任意の距離・ファイバ品質での接続を可能にするため、複数ベンダ・複数伝送モードでの自動最適モード選択を可能とすること

## 3.2 特性不明のユーザーアクセスリンクを介した光パス設計と提案するアーキテクチャ・プロトコル

本節では、これまで研究されてこなかった、DCX サービス実現に必要なアーキテクチャとプロトコルについて論ずる。まず AAL 上の光パス設計に適用可能な 2 つのアプローチを紹介してそれぞれの利点と欠点について論じ、続いてユーザーとキャリアが協調した光 WDM パス設計を実現するためのアーキテクチャとプロトコルを提案する [78]。

### ■3.2.0.1 ユーザー主体の E2E QoT 推定に基づく光 WDM パス設計

このアプローチでは、プロービング用の空チャンネルを準備する以外はキャリアが関与することがなく、ユーザーのみが光パスを設定作業を行う。設計のステップは以下の通り：

- a) Tx のユーザーがキャリアにプロービング用の空チャンネルの準備を依頼する。
- b) キャリアはチャンネルを準備し、その波長をユーザーに通知する。
- c) ユーザーは TRx に波長を設定する。
- d) ユーザーは推定された条件を用いて TRx のモードを選択する。
- e) ユーザーは選択したモードで TRx を設定する。

このアプローチの利点は、ユーザーが主体的に光 WDM パスを実装できるため、システムが簡素化され、キャリアとのシステム連携が不要になることである。しかしキャリアとの連携がないことから DCX のサービス要件を満たすことができず、故障時のルート切替や 4 章で述べる伝送路システムの新設工事などを実施する際に自動化が難しい。また対向する 2 拠点を別々に開通工事することができないといった運用上の課題がある。

### ■3.2.0.2 ユーザーとキャリアが協調した光 WDM パス設計

このアプローチでは、光パスは以下のステップで確立される：

- a) Tx ユーザーはキャリアに光パスの確立を要求する。
- b) ユーザーは、その TRx の特性を安全なチャンネルを介してキャリアに送信する。
- c) ユーザーとキャリアは互いに協調して AAL パラメーターを推定する。
- d) ユーザーまたはキャリアは、推定されたリンクパラメーターを使用して TRx モードを選択する。
- e) ユーザーまたはキャリアは、選択したモードで TRx を設定する。

このアプローチであれば、ユーザーとキャリアが連携することで様々な DC に設置された多種多様な TRx 間を接続

しやすく、3.1.1 節に示したユーザーとの協調の要件を満たすことができる。さらに、ユーザー主体のアプローチの欠点であった故障時のルート切替や 4 章で述べる伝送路システムの新設工事の自動化がしやすいたとも、キャリアが集中管理することで利便性が向上し多くのユーザーが伝送路システムをシェアできればファイバー利用効率やエネルギー効率の向上も期待できる。DCX サービス実現には、光パス自動設計・運用により信頼性向上を図り、イレギュラーな接続を回避しつつ多種多様な TRx と接続する必要があるため、以後はユーザーとキャリアが協調した光 WDM パス設計をベースに議論を進める。

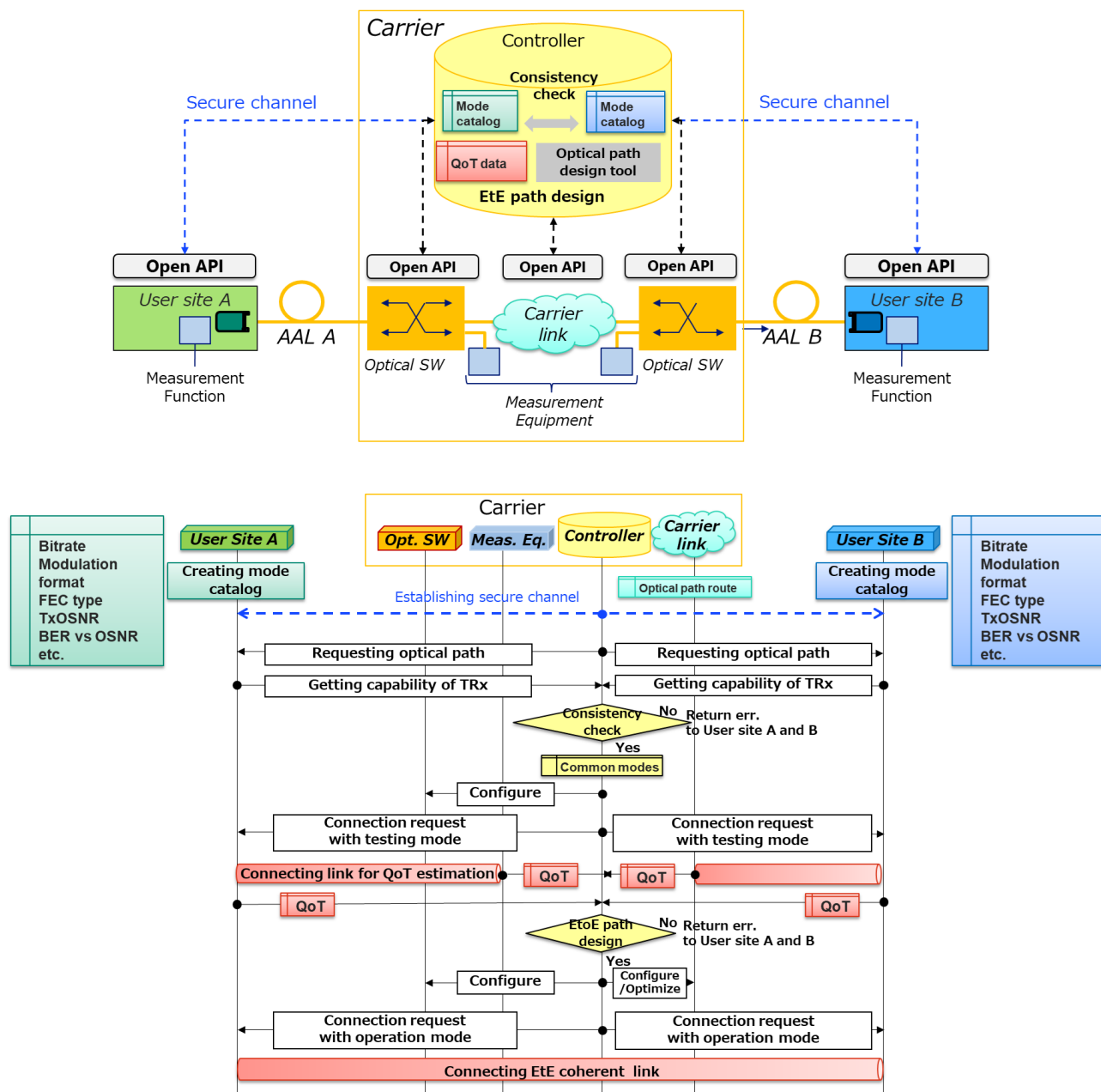


図 3.5 ユーザーとキャリアが協調した光 WDM パス設計を実現するためのアーキテクチャとプロトコル

図 3.5 の上側は提案するアーキテクチャを示す。まず、推定の精度を向上させるために、長い E2E パスをユーザー側セクションとキャリア側セクションに分割する。Optical Switch はキャリアエッジに配置されており、ユーザー側からのパスをキャリア内の測定装置に迂回させ、ユーザー TRx からの信号を利用して AAL パラメーターを推定

する。ここで、3.1.1 に示した BER を使う推定の場合は Pre-FEC BER を利用し、DLM を使う推定の場合は DSP からの信号データを利用する。ユーザー TRx と測定装置は、標準化された相互運用可能なモードを使用して通信する [16]。コントローラーはキャリア内に実装され、Mode consistency check 機能と E2E path design 機能を持つ。後者は推定したリンクパラメーターと TRx 情報を Optical path design tool に入力し、E2E 光パスを設計する。その後、Optical Switch がユーザー側パスを測定装置から E2E リンクに切り替え、E2E パスを確立する。E2E 光パスの設計には、アクセス区間とキャリア区間のリンクパラメーター情報と、ユーザー TRx の特性情報が必要となる。ここで、キャリアリンクのパラメーターは一般にユーザーには開示されないが、ユーザー TRx が設定可能なモードについては、ネットワークの品質と安全性を管理するために必要であるため、キャリアからアクセスできる必要がある。さらに、提案システムは異なるベンダの TRx 間でも接続可能とする。設定可能なモードは一般にベンダ、世代、バージョンによって異なるため、キャリアは TRx の Capability 情報を自動的に収集し、モード整合性チェックを実行するメカニズムが必要となる。

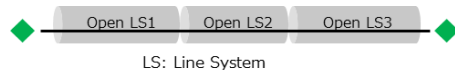
図 3.5 の下側は提案するプロトコルを示す。全てのコンポーネントは、セキュアなチャネルを確立してキャリアコントローラーと接続・通信する。ユーザーサイト A と B の TRx は、それぞれ AAL A と B を介してキャリアの Optical Switch に接続されている。両端のスイッチはキャリアリンクを介して接続されており、AAL からキャリアリンクまたは測定装置のいずれかに信号を切り替えることができる。両ユーザーサイトにて Mode catalog (Bitrate・Modulation format・FEC type など) が生成され、キャリアコントローラーに送信される (図 3.5 の下図上段参照)。コントローラーは、TRx から受信した Mode catalog を比較して、共通モードのリストを作成する (図 3.5 の下図中段参照)。相互接続可能なモードが存在しない場合は、TRx にエラーを返す。コントローラーは、あらかじめキャリアリンクから光パス経路のリストを取得し、光スイッチを用いてユーザーサイトの TRx とキャリアエッジの測定用装置を接続する。その後、1.1.3 節に示した BER を使った推定または DLM を実行し、AAL の QoT を推定する。推定された QoT はすべてコントローラーに集められ、コントローラーは光パス設計ツールを使用して、A, B 拠点に対して提供可能な光パス経路ごとに E2E QoT (Generalized SNR 等) を計算する。コントローラーは、光パスの共通モードリストを参照して、最適な光パスルートと伝送モードを決定する。相互運用可能なモードが存在しない場合、コントローラーは TRx にエラーを返す。最後に、Optical switch を切り替えてキャリアリンクと AAL を接続し、両端の TRx に決定した伝送モードを設定して接続することにより、パスを確立する。

なお、DLM は (本論文執筆時点で) 限られたハイエンドの TRx にしか実装されていないため、本章の以降の節では各種商用 TRx で活用可能な BER を使った推定 (1.1.3.1 節参照) を前提とする。

本節で提案したアーキテクチャとプロトコルを活用することで、キャリアは TRx で発生するノイズなど TRx のパラメーターを設計に盛り込むことができるようになり、ユーザーとキャリアが協調した WDM パス設計が可能となる。

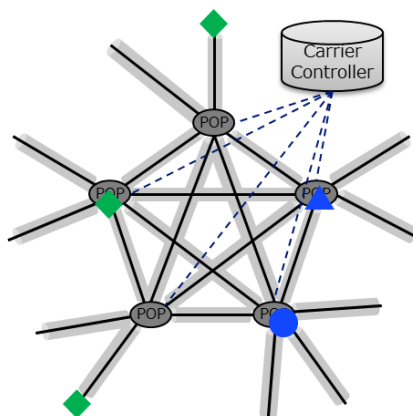
### 3.3 全 End-to-End の光パスをオンデマンドで正確に GSNR 推定する手法

本節では、3.1.1 節に示した要件を満たすために不可欠な、オンデマンドでの WDM プロビジョニングと最適モード選択のための手法について論ずる。図 3.6 (a) は OSaaS の構成図 [15] であり、Open Line System (LS) で構成さ



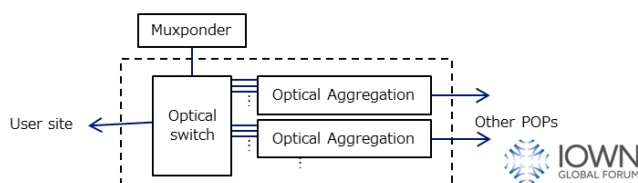
- PtoP connection with multi-domain Open LSs.
- DWDM TRx and Open LSs can accommodate a large number of users.

(a)



- Many-to-many connections
- DWDM TRx and POPs

(b)



(c)

図 3.6 DCX のネットワーク構成例 (a) OSaaS の構成、(b) DCX の構成、(c) POP 構成の例

れ、DWDM を適用することで多数のユーザーを収容できる。図 3.6 (b) は DCX を構成するネットワークの例であり、図 3.6 (c) の POP に Optical switch と Optical aggregation からなる機能分離型 ROADM 装置 [70] を適用したものである。図 3.6 (a) と同様に、DCX は DWDM 技術によって多くのユーザーグループを効率的に収容することができる。図 3.7 (a) は 2 つのユーザーサイトを DCX で接続する場合のパターンを示している。遅延を最小にするためにユーザーサイト間の POP 数を 3 つまでに制限した場合、図 3.7 (a) のように 4 つのパターンがある (POP

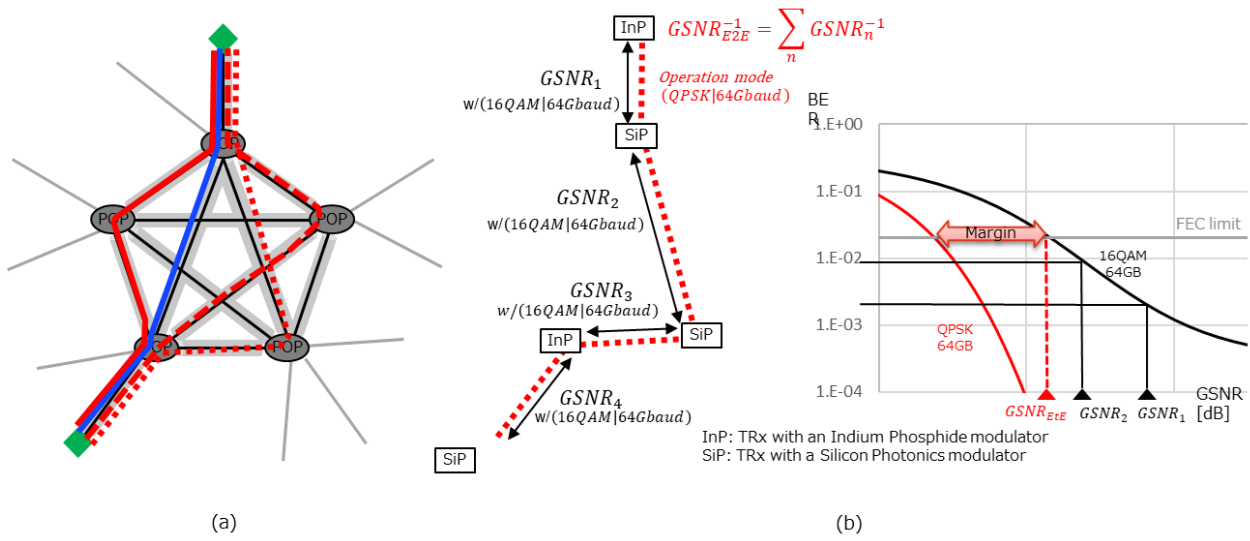


図 3.7 高精度かつ短時間で最適モードを選択するアプローチ (a) 2つのユーザーサイト間の経路 (通過する POP を最大 3つと制限した場合)、(b)Link-by-Link でかつ複数伝送モード・異種変調器でのプロンプと最適モード選択

2つ：青線 1 パターン、POP 3つ：赤線 3 パターン)。図 3.6 (b) の 5つのサイトを接続する場合、40 以上のパターンが考えられる。多種多様かつユーザーアクセス経路で任意拠点に設置された TRx を制御・監視・最適化するためには、各サイト間の E2E GSNR を正確に求め、最適なモードを短時間で選択する必要がある（ここでは、ルーティングと波長割り当てには既存の技術を適用できると仮定し、本論文では WDM 光路のファイバー伝搬設計のみを論ずる）。

### 3.3.1 短距離伝送設計のための GN モデル

1.1.2 節において、GN モデルを用いた簡易な設計手法について述べた。今回のユースケースである DCX は直径約 200 km のメトロエリアをターゲットとしているため、このような Short reach～Metro 領域に適用できる簡易な設計手法が必要となる。コヒーレント TRx の Back-to-back 特性は、様々な変調フォーマット・ボーレート・変調器タイプについて、長距離だけでなくメトロ領域でもガウスノイズ近似を適用することで正確にモデル化できることが [77] で示されている。式 (3.2) は、ビット誤り率 (BER) と、DP-16QAM や DP-QPSK などの各変調フォーマットの関数として GSNR との関係を示しており、式 (3.3) は 16QAM と QPSK の場合のエラー関数を示している。また GSNR の逆数は式 (3.4) のように、3つのノイズ源に由来する SNR 項の逆数の和であること筆者らは以前 [77] に示している。第 1 項目は TRx 固有の Back-to-back 特性、第 2 項目はアンプの自然放出、第 3 項目はファイバーの非線形光学効果による雑音を示す [77]。QoT 指標には BER や GSNR が挙げられる。もう一つの QoT メトリクスとして広く使われている  $Q^2$  ファクタは、BER と次のような一対一の関係がある。

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{Q^2}{2}} \right) \quad (3.1)$$

従って、BER と  $-Q^2$  ファクタは同じように扱うことができる：

$$\text{BER} = \Psi_{\text{MF}}(\text{SNR}), \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{MF}} &= \frac{3}{8} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{\text{GSNR}}{10}} \right) \text{ for 16QAM} \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{\text{GSNR}}{2}} \right) \text{ for QPSK} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\text{SNR}^{-1} = \text{SNR}_{\text{TRx}}^{-1} + \text{SNR}_{\text{ASE}}^{-1} + \text{SNR}_{\text{NLI}}^{-1} \quad (3.4)$$

また [77] では、InP 変調器と SiP 変調器のそれぞれを実装した 2 種類の商用 TRx で実験を行い、式 (3.2)～(3.4) がどちらの変調器に対しても有効であることを確認した。さらに E2E SNR の逆数は、式 (3.3) のように、TRx 特性  $\text{SNR}_{\text{TRx}}^{-1}$  の逆数と各リンクの特性  $\text{GSNR}_{\text{LS},n}^{-1}$  の逆数の和に等しいと仮定する。この式は、図 3.6 (a) のような Point-to-point の 3,116 km の伝送に対して、 $\pm 1.4$  dB の精度で成立することが [74] で報告されているが、図 3.6 (b) の場合の精度を検証する実験はこれまで行われてこなかった：

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{\text{E2E}}^{-1} &= \text{SNR}_{\text{TRx}}^{-1} + \sum_n \{ \text{SNR}_{\text{ASE},n}^{-1} + \text{SNR}_{\text{NLI},n}^{-1} \} \\ &= \text{SNR}_{\text{TRx}}^{-1} + \sum_n \text{GSNR}_{\text{LS},n}^{-1} \end{aligned} \quad (3.5)$$

これらの結果を用いることで、TRx の変調方式や変調器の種類に関係なく、またそれぞれの E2E パスごとに QoT を直接測定することなく、各経路の E2E SNR を短時間で推定することができる。図 3.7 (b) は、図 3.7 (a) の経路の 1 つについて、測定上都合の良い（測定しやすい）モードと複数種類の変調器を用いてリンク毎に QoT を測定し、E2E SNR を計算して運用モードを選択する手順を示している。GSNR<sub>1</sub> を InP 変調器と SiP 変調器を用いた TRx 間で測定する場合を例に説明する。単一スパンでは QoT が比較的高いので、16QAM 64Gbaud モードで BER を測定し、GSNR に変換する。その後、リンク毎の GSNR の逆数を算出して和をとることで GSNR<sub>E2E</sub> を算出し、運用マージンを加算した上で最適なモードを選択する [22, 79]。この例では、GSNR<sub>LS,n</sub> の推定において、16QAM 64Gbaud を使用して各リンクの GSNR を求め、それらの結果から計算された GSNR<sub>E2E</sub> に運用マージンをのせた値に基づいて、QPSK 64Gbaud が選択されている。このアプローチは各社コヒーレント TRx における一般的なパラメーター（BER、変調フォーマット、ボーレート）を使用するため、特定のデバイスに制限されることなく、全てのコヒーレント TRx に適用できる。

以上のように、本節で提案した手法は、GN モデルに基づき Link ごとに測定上都合の良いモードで QoT をプローブ計測・加算して全 E2E の光パスの QoT を推定するため、3.1.1 節に示した多対多拠点設計、複数ベンダ・複数伝送

モード対応した迅速なノイズ推定を実現することができる。

### 3.4 End-to-End の GSNR 測定結果と推定誤差

本節では、3.3 節で紹介したリンクごとの測定手法による誤差・波長依存性・Q 値変動について、市販のオープンシステムとフィールドファイバーを用いて評価した結果を示す。

#### 3.4.1 実験構成

図 3.8 (a) および図 3.8 (b) は、ニューヨーク市ハーレムに配備された都市規模のプログラマブル・テストベッドである米国 National Science Foundation (NSF) の COSMOS テストベッドを使用した、フィールドトライアルのセットアップを示す。COSMOS テストベッドは、光空間スイッチや Lumentum ROADM-20 ユニットを含むプログラマブル光ネットワーク環境を備えており、これまでに多くの実験が実施されてきた [80, 81, 82]。筆者らは市販の光送受信装置とフィールドファイバーを利用し、2つのユーザーサイト、2つの POP、AAL1・AAL2・CL を、C バンドで3つの異なるパス (32 km/72 km/122 km) で実験的に構築した。

本実験では、オープンアーキテクチャに基づいたオンデマンドな WDM provisioning を実現している。TIP の Phoenix [69] に準拠した Muxponder を配備し、TIP にて開発中の TAI [58] と Goldstone NOS [65] をベースにした NEC の NOS を適用した。これらの Muxponder に、OpenROADM 準拠の 2 社の商用 400G CFP2-DCO プラガブル TRx (インジウムリン・シリコンフォトニクスの異なるタイプの変調器を実装) を適用した。ユーザー TRx と POP のネットワークアーキテクチャには、IOWN Global Forum にて提案されたアーキテクチャを採用した。制御プレーンの相互運用性を提供するためには、WDM プロビジョニングとユーザー TRx の監視／設定機能が必要になるが、現時点でこれらは標準化がなされていないため、内製のソフトウェアライブラリ (Auto Optical Path Provisioning) を使って実装した。

図 3.8 (c) は、この実験で使用したマンハッタンのダークファイバールートである、コロンビア大学と 32 Avenue of the Americas のコロケーション DC 間の 32 km のループバックフィールドファイバー (Boldyn 社提供) と、コロンビア大学とニューヨーク市立大学間の 8 km のループバックフィールドファイバー (CrownCastle 社提供) を示す。AAL1 は、ROADM と 32 km のフィールドファイバーで構成し、CL に接続した。AAL2 は、ROADM と 40 km のスプールファイバーで構成した。CL は、異なる長さ・損失のルートを備えており、インサービス・チャンネルを模擬するために合計 25 個の WDM バックグラウンド・チャンネルが挿入されている (詳細は 3.4.3 節で述べる)。ファイバーリンクへの入力パワーはすべて +4 dBm/チャンネルとした。POP には 2 つの Muxponder が設置され、Pre-FEC BER のプロービング測定用に AAL と CL を接続している。コントローラーは、gRPC を使用して事前に確立されたセキュアなチャンネルを介して、ユーザーサイトおよび POP の Muxponder と通信する。

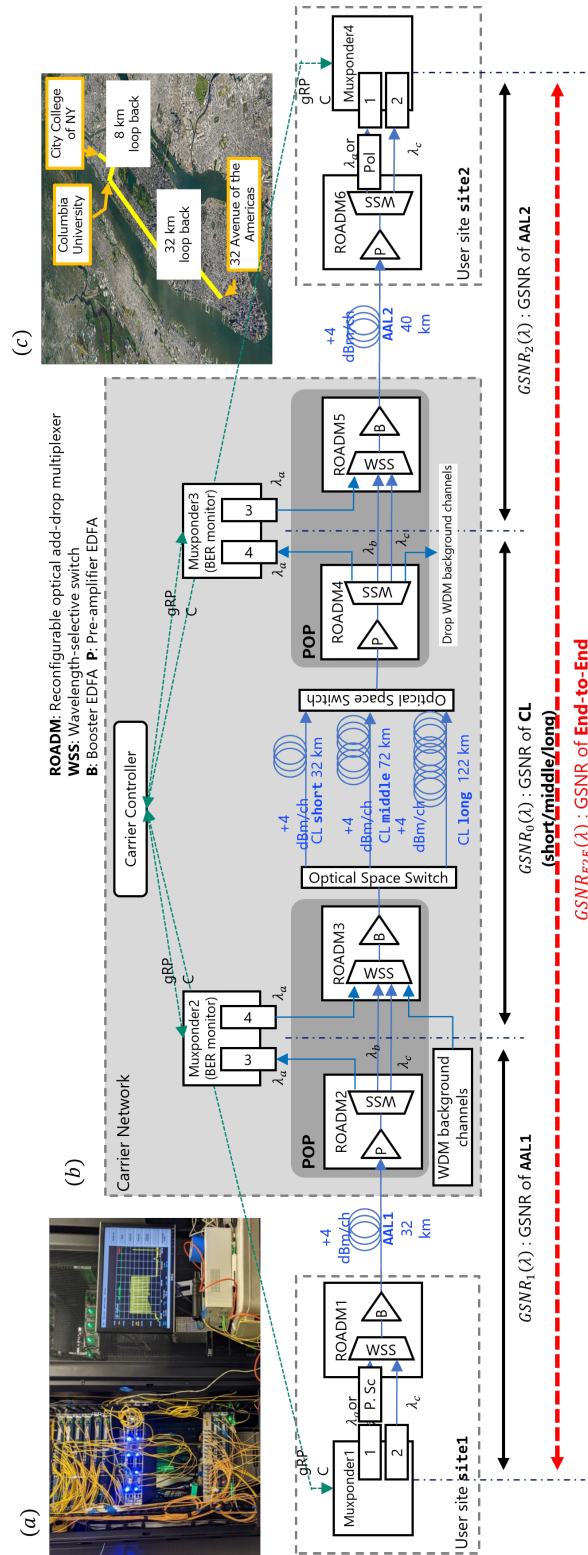


図 3.8 COSMOS テストベッド内の装置 (b) フィールドトライアルのセットアップ、(c) フィールドファイバールート

### 3.4.2 Link-by-link の測定誤差

図 3.7 (b) に示したアプローチの誤差を決定するために、図 3.8 (b) に示すように、E2E の GSNR の測定値 ( $GSNR_{E2E}$ ) とリンク毎の測定値 ( $GSNR_1$ ,  $GSNR_0$ ,  $GSNR_2$ ) による GSNR の推定値を比較した。ここで縦軸の

$GSNR$  は TRx とリンクを含む全ての  $GSNR$  を示す。図 3.9 (a) は 191.5 THz、図 3.9 (b) は 194.6 THz における

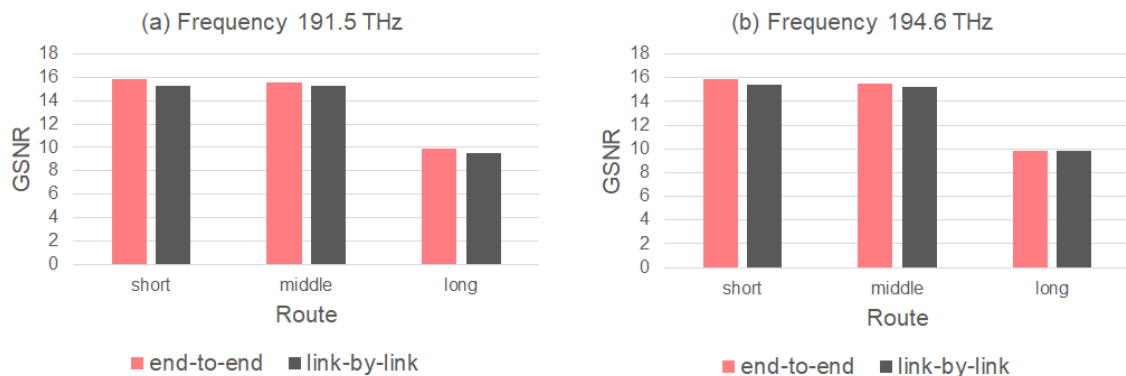


図 3.9 E2E の  $GSNR$  の測定値とリンクごとに推定した  $GSNR$  の比較 (a) 周波数 191.5 THz、(b) 周波数 194.6 THz

2つの  $GSNR$  の差を示す。光スイッチで CL を変化させ、ショート・ミドル・ロングの3つのルートパターンで評価した。波長や CL 距離に大きな違いはなく、誤差は 0.3~0.6 dB であった。

### 3.4.3 波長依存性に起因する誤差

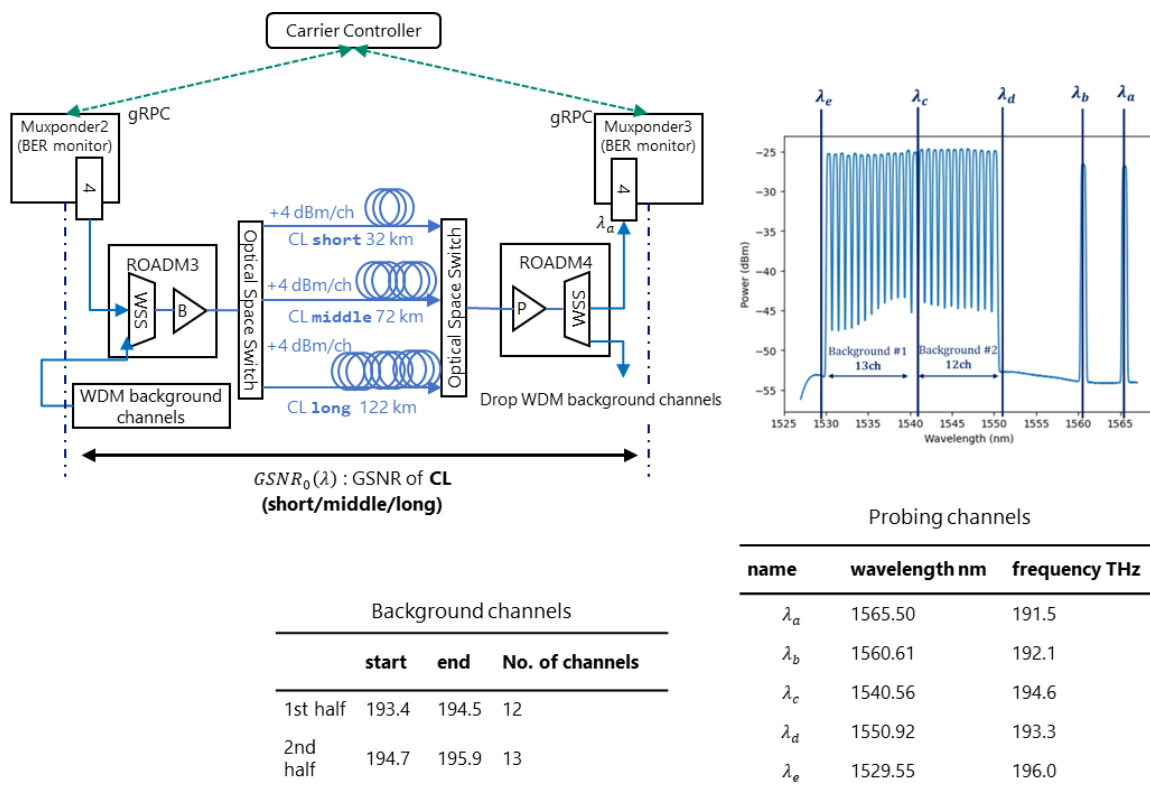


図 3.10 波長依存性に起因する誤差を測定するための実験セットアップ

図 3.10 は実験システムの構成を示し、挿入図は WDM スペクトラム割り当てを示す。リンクシステムの波長依存性を測定するため、Muxponder 2 と Muxponder 3 の間に図 3.10 中の表に示すプロービングチャンネルを設けた。光空間スイッチで CL を変更し、既存のインサービス・チャンネルを模擬するために、25 個の WDM バックグラウンド・チャンネルと 100 GHz 間隔 (図 3.10 のバックグラウンド・チャンネルの表を参照) を合波して、ショート・ミドル・ロ

ングの3パターンで評価した。 $\lambda_a$  (191.5 THz、Cバンドの端)を他の波長のチャンネルのプロープ信号として利用できるかどうかを検証するため、 $\lambda_a$ で測定したGSNRと異なる波長(b、c、d、e)で測定したGSNRの差を比較した。伝送路システムによるGSNRプロービングの波長依存誤差は、短波長、中間波長、長波長でそれぞれ0.05 dB、0.11 dB、0.22 dBであった。 $\lambda_c$ はバックグランドチャンネルの中心に位置しているが、 $\lambda_a$ や他の波長との有意な差は観測されなかった。このことは、このメトロスケールシステムで予想されるように、ファイバーの非線形効果による波形の劣化は、TRxのBack-to-back特性の影響に比べ、このシステムでは比較的小さいことを示唆している。

#### 3.4.4 実験系のGSNR揺らぎ

実験系におけるGSNRの実測値は常に変動している。推定誤差の妥当性を検証する際、この変動より誤差を小さくすることはできないため、GSNRの変動量を評価し、今回測定した推定誤差の妥当性を論ずる。3つのリンク(AAL1, AAL2, CL1)とE2Eのパスで5秒毎にGSNRを測定し、5分間の移動平均の揺らぎ量を算出した。GSNRの変動量は、5分移動平均の5パーセンタイルと95パーセンタイルの差と定義する。測定は7日間行った。GSNRは5秒ごとに約0.2~0.4 dBの時間変動を示した(図3.11左)。通常は複数の観測の平均値を用いるので、移動平均の変動量を評価した。平均ウインドウの周期を5分とし、5分間の移動平均は0.1~0.2 dB程度の時間変動を示した。AAL1、AAL2、CL、E2EのGSNR変動量はそれぞれ0.15、0.10、0.07、0.07 dBであり(図3.11右)、全体として約0.1~0.2 dBの範囲であった。

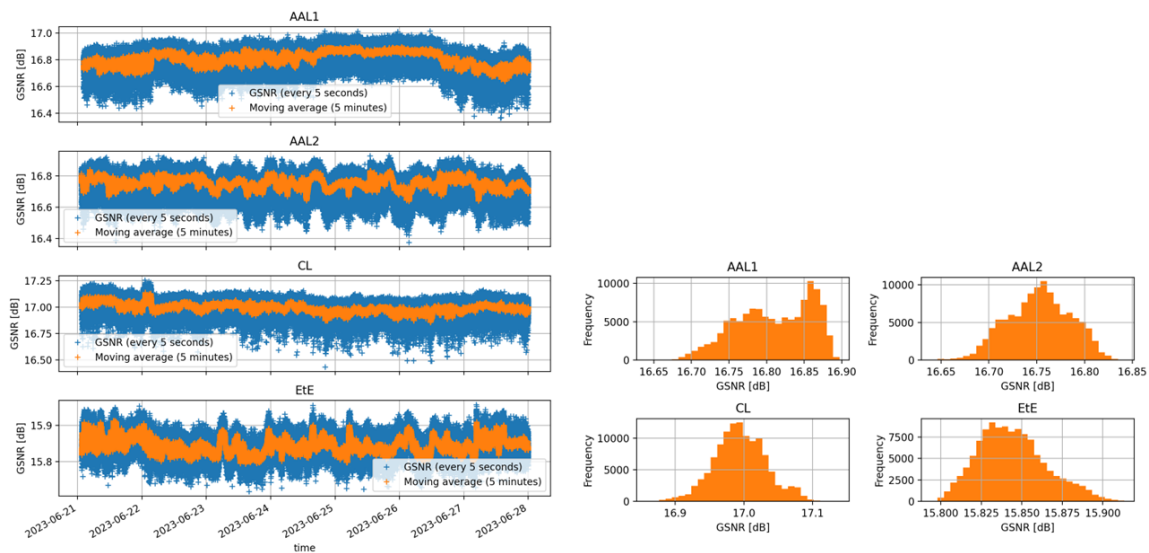


図 3.11 GSNR の時間変化 (左) と 5 分移動平均のヒストグラム (右)

#### 3.4.5 推定誤差のまとめ

表 3.1 は、図 3.8 の実験セットアップの推定誤差を示している。リンクごとのアプローチと任意の波長のプロープ光を使用した迅速な WDM プロビジョニングに必要なマージンは全体で 0.7 dB であった。この値は、システムの

| Transmission distance | LbL measurement error | WL-dependent error | Required margin |
|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| ~100 km               | 0.60 dB               | 0.05 dB            | 0.65 dB         |
| ~150 km               | 0.32 dB               | 0.11 dB            | 0.43 dB         |
| ~200 km               | 0.47 dB               | 0.22 dB            | 0.69 dB         |

表 3.1 推定誤差

GSNR 変動 0.1~0.2 dB と同じオーダーであり、図 3.7 に示したアプローチでは、利用可能な波長であれば、わずかなマージンで使用することができることが分かった。

### 3.5 フィールドファイバーを用いたオンデマンドな WDM プロビジョニング実験の結果

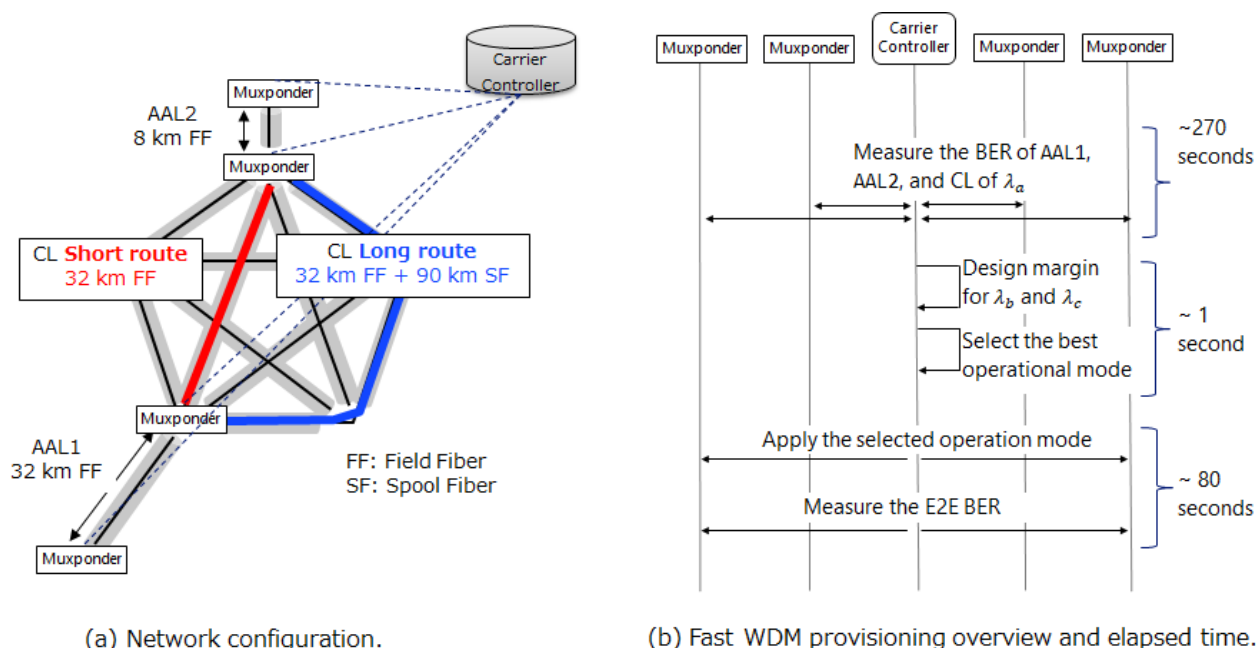


図 3.12 WDM プロビジョニング実験 (a) ネットワーク構成、(b)WDM プロビジョニング

本節では、提案アーキテクチャを実装し、図 3.8 (c) に示すフィールドファイバーを用いた2つの経路（ショート・ロング）について、各リンクの品質推定、E2E 光パスマージンの設計、User Muxponder のリモート設定に要する時間を評価する。

図 3.12 (a) は実験のネットワーク構成を示す。図に示したルートを用いて、図 3.8 に示した実験構成の中の AAL1・CL・AAL2 を構成した。図 3.8 (c) に示す2つのダークファイバールート（32 km と 8 km）を使用した。短い CL（32 km のフィールド・ファイバー）と長い CL（32 km のフィールド・ファイバー+ 90 km のスプール・ファイバー）は、リンク条件に応じて長さと損失が異なり、既存のインサービス・チャンネルを模擬するために合計 25 の WDM バックグラウンド・チャンネルが挿入されている（図 3.10 と同様）。

図 3.12 (b) は、WDM プロビジョニングの概要と経過時間を示している。コントローラーは、全 Muxponders から TRx 特性（JSON 形式）を収集し、Muxponders を使用して AAL1、AAL2、および CL の BER を測定する。プ

ロービング信号として (191.5 THz) を使用した。コントローラーは、図 3.7 (b) のアプローチを使用してマージンを計算し、最適な動作モードを選択する。最後に、コントローラーは User Muxponder に伝送モードを設定し、E2E BER を測定する。プロビジョニングにかかった合計時間は 351 秒で、その内訳はリンク BER 測定に 270 秒、マージン設計とモード選択に 1 秒以下、User Muxponder の設定と BER 測定に 80 秒であった。

| Route | AAL1              | CL                | AAL2              |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Short | 1.24e-3 (23.3 dB) | 1.03e-3 (23.9 dB) | 5.64-e4 (27.2 dB) |
| Long  | 1.14e-3 (23.6 dB) | 1.75e-3 (12.4 dB) | 1.21e-3 (23.0 dB) |

表 3.2 BER 測定結果 (括弧内は GSNR 換算値)

ユーザーからの 400G の帯域幅要求を想定して、ショートとロングの 2 つの経路をプロビジョニングした。表 3.2 に、AAL1、CL、および AAL2 の BER の測定値と GSNR の換算値を示す。コントローラーはこれらの GSNR 測定値を取り込んで E2E GSNR を推定し、光パスのプロビジョニングを行った。その結果を表 3.3 に示す。ショートルートでは、コントローラーは 5.2 dB の十分大きな GSNR マージンを確保できたため、 $\lambda_b$  を使用して 400G DP-16QAM (1 波長) を正しく選択した。迂回のロングルートでは、E2E の GSNR が低く 400G DP-16QAM で十分なマージンを確保できないため、コントローラーは  $\lambda_b$  と  $\lambda_c$  を使用した 2 波長の 200G DP-QPSK パスを選択した。これらの 2 つのパスで確保されたマージンはそれぞれ 5.1 dB と 4.9 dB であった。全てのケースにおいて、Q ファクタ (BER) の推定値・実測値の差は 0.7 dB 未満であった。

| Route | Ch          | $GSNR_{LS}$ | Mode  | Margin | Est. GSNR(Q)    | Mes. GSNR(Q)    | Error GSNR(Q) |
|-------|-------------|-------------|-------|--------|-----------------|-----------------|---------------|
| Short | $\lambda_b$ | 19.7 dB     | 400 G | 5.2 dB | 15.47(8.79) dB  | 16.12(9.40) dB  | 0.65(0.61) dB |
| Long  | $\lambda_b$ | 11.7 dB     | 200 G | 5.1 dB | 10.63(10.63) dB | 11.22(11.22) dB | 0.61(0.59) dB |
| Long  | $\lambda_c$ | 11.6 dB     | 200 G | 4.9 dB | 10.63(10.63) dB | 11.94(11.94) dB | 0.31(0.31) dB |

表 3.3 推定 GSNR E2E、選択モード、確保マージン、推定 Q マージン、実測 Q マージン)

### 3.5.1 プロビジョニング時間のまとめ

切り替えに要した時間について、そのほとんどは TRx の設定変更後の再起動による時間であった。この時間は CFP MSA 等で規定されている TRx の状態遷移に依存するため、将来更なる時間短縮のためには MSA の見直しを検討する必要がある。1.2.1 節に示したプロビジョニングに割り当て可能な時間 10 分以内に対し、図 3.12 の (b) に示すように、今回の実験で WDM プロビジョニング全体を 6 分以内に完了できることを実証した。

### 3.6 今後の課題

C バンドを用いた実験系では波長依存性やファイバーの非線形効果は比較的小さかったが、DCX サービスを提供する際には、C+L マルチバンドなどの他の回線系や様々な特性のファイバーの適用がありうる。このような場合、アンプの利得や雑音指数の波長依存性、ファイバーに起因する非線形効果を推定する技術が不可欠となる。波長依存性の問題は、複雑なアンプの利得プロファイルを予測するために、Transfer Learning (TL) などの最新技術を適用することで解決できるかもしれない [83]。DCX オペレーターは、TRx からコントローラーへテレメトリを送信するために、コンテナと TAI に基づいた装置ソフトウェアアーキテクチャを適用することで、ユーザーに対して拡張したサポートサービスを後から追加して提供できるようになる。筆者らは TAI をハードウェアの抽象化 IF として使用し、CFP2-DCO をコヒーレント TRx として使用したが、DCX は DC オペレーターによって広く使用されている QSFP-DD のような他のフォームファクターにも対応する必要がある。QSFP-DD 制御のソースコードは SONiC [35] で公開されているため、TAI の代わりにこれを利用すべきである。CFP MSA [18]、CMIS[19]、およびコヒーレント CMIS [84] などの異なる MSA を効率的に収容するアーキテクチャが必要となる。

本研究では、経路と波長選択については GMPLS 関連研究や RWA 問題として数多くの研究がすでに発表されているため対象外としたが、今後はこれらの既存研究と連携動作させるためのアーキテクチャ・プロトコル議論も必要である。

### 3.7 まとめ

DCX はメトロエリアに分散した多数の DC を拡張性・信頼性・低遅延性を確保しつつ、ユーザーアクセス回線・多種多様な TRx や伝送路システムの接続・イレギュラーな接続の回避を可能とすることで、仮想的な大規模 DC を実現する。本章では、ユーザー拠点に配置されるデジタルコヒーレントトランシーバーの伝送パラメーターを遠隔から設計・最適化するコントローラー技術について論じ、フィールド実証などの実験結果を通して 1.2.1 節のコントローラーに関する目標を達成したことを示した。

ユーザー TRx 特性を参照したプロビジョニング・リルートを可能とする要件については、3.2 節で提案したアーキテクチャとプロトコルを活用することで、DCX において支配的な劣化要因である TRx ノイズ及び TRx のパラメーターを設計に盛り込むことが可能となることを論じ、2 章に示したアーキテクチャと内製ソフトウェアライブラリ、フィールドファイバーを用いて自動で実行可能であることを実証した。

任意の多対多拠点間の多様なトポロジーに対応する要件については、3.3 節にて、GN モデルに基づき Link ごとに測定上都合の良いモードで QoT をプローブ計測・加算して全 E2E の光パスの QoT を推定するため、多対多拠点設計、複数ベンダ・複数伝送モード対応した迅速なノイズ推定を実現できることを示した。3.4 節にて、市販のオープン

システムとフィールドファイバーを用いて評価した結果、リンクごとのアプローチと任意の波長のプローブ光を使用した迅速な WDM プロビジョニングに必要なマージンは全体で 0.7 dB（リンクごとの誤差 0.6 dB 以内、波長依存性による誤差 0.3 dB 以内）であることを確認した。

距離や QoT に応じた最適モードの自動選択の要件については、3.3 節にて、GN モデルに基づき、代表モードでプローブした結果と TRx 特性情報（TxOSNR の異なる TRx の場合も含む）から全てのモードの QoT を推定可能な方式を提案した。3.5 節にて、インジウムリン・シリコンフォトニクスによる原理の異なる変調器を搭載した異ベンダ TRx と、72 km と 152 km の 2 つの経路を適用してこの方式を検証したところ、前者には 16QAM 400 Gbit/s 1 波長、後者には QPSK 200 Gbit/s 2 波長が十分なマージンと共に正しく割り当てられたことを確認した。

1.2.1 節に示したプロビジョニングに割り当て可能な時間 10 分以内に対し、今回の実験で WDM プロビジョニング全体を 6 分以内に完了できることを実証した。リンクごとのアプローチと任意の波長のプローブ光を使用した迅速な WDM プロビジョニングに必要なマージンは全体で 0.7 dB であった。この値はシステムの GSNR 変動 0.1~0.2 dB と同じ桁に収まっており、1.2.1 で設定した到達目標を達成した。

米国 COSMOS テストベッドのフィールドファイバーを用い、リンク性能が最大になるように TRx のパラメータを設定するオンデマンドな WDM プロビジョニングを人手を介さず自動的に実施する実験を行い、WDM プロビジョニング全体を 6 分以内に完了できることを実証した。また、この際に必要なマージンは全体で 0.7 dB であり、システムの GSNR 変動 0.1~0.2 dB と同じ桁に収まったことを確認し、到達目標を達成した。

## 4 光ファイバーモニタ・物理レイヤモデルを用いた伝送路システム最適化技術

### 4.1 はじめに

1.1.6 節で述べたように、取り巻く環境の変化に伴い、メトロエリアに分散するあらゆる DC を光ファイバーで直接接続して、各社のクラウドサービスや MEC とそれらに接続するユーザーとの間に大容量の光パスをオンデマンドに確立する、DCX サービスへの期待が高まっている [47]。近年、コンピューター間通信において低遅延性に関するニーズが強く、既に光ファイバー経路が存在したとしても、より距離の短い光ファイバー経路を新設することで低遅延アプリケーションへの要求に応えるといった事例が発生しており、ネットワークに対する要件は近年急速に変化してきている。また IOWN Global Forum 等で、インタラクティブな音楽ライブエンターテインメントや遠隔操作など、新たなアプリケーションのユースケースが業界横断的に検討されて将来のネットワークに対する遅延要件が明確化されつつある [85]。今後も低遅延性に対する要求は拡大していき、ユーザーの新しいニーズに応じて柔軟・迅速に伝送路システムを構築・運用する技術が必要になると考えられる。本章では、低遅延性に大きな影響を及ぼす伝送路システムに関して、システムベンダに依存しない共通的かつ自動の伝送路モニタ・パラメーター推定技術について論じ、フィールド実証などの実験結果を通して 1.2.1 節の伝送路システムに関する目標（以下）を達成したことを示す。

- システムベンダに依存しない共通的かつ自動の伝送路モニタ・パラメーター推定
  - － 既設ベンダ以外の装置を用いて新設の伝送路システムを構築したいケースに対応
  - － 品質やパラメーターが不明な回線を使った提供が可能
  - － 従来運用手法に適合しつつ、迅速にプロビジョニングや不具合切り分けが可能
- 数値目標：伝送設計に必要な全ての物理パラメーターを伝送路から抽出して可視化し、別のタイムゾーンにいる監督者がオープンなツールを用いて設計・解析して工事の完了または切り戻しを判断できることを、フィールドファイバーを用いて以下の条件で実証
  - － ユーザーから回線借用する際のメンテナンスウィンドウ 2 時間の半分以上
  - － 工事担当者を現地派遣して最適化を行う際の設計誤差以下

はじめに、4.1.1 節にて関連研究を通して伝送路システムの現状を示し、本研究が目指す伝送路システムの要件を分析する。続いて、4.2 節において光回線のプロビジョニングを技術者による確認をシーケンスに盛り込んで Semi-automatic に実行するための提案手法を示し、続いて QoT の測定手法とそれらと予測値との比較について説明する。4.3 節では、制御のシナリオと、プロビジョニング動作管理のための制御アーキテクチャを示す。4.4 節で実験構成を説明した後、4.5 節にて実行時間・物理パラメーターの可視化・性能検証・ベースライン比較・システムの Q ファクタ変動・運用上の考察を含む、1 時間以内でのプロビジョニングとメンテナンスの達成結果を報告する。4.6 節

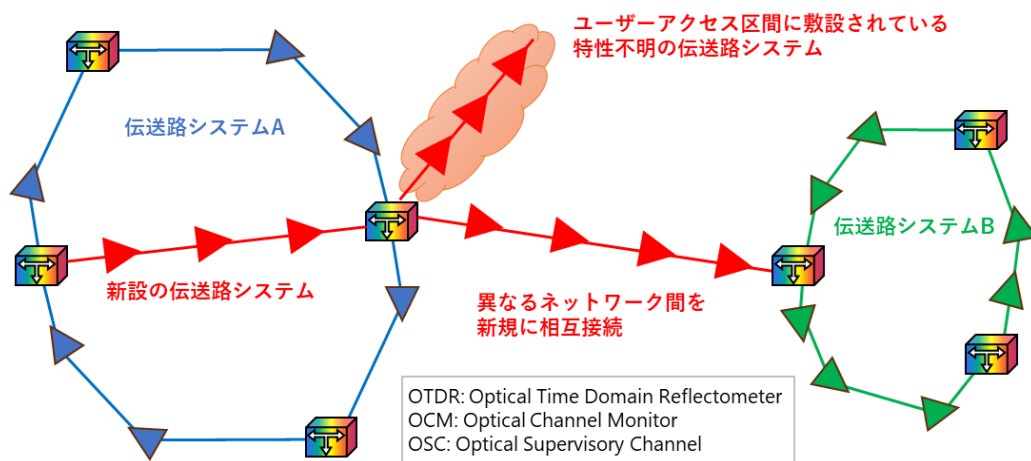
では、紹介した技術を故障箇所特定に応用した実験結果を報告する。4.7 節では、性能向上のための今後の課題と新たなユースケースへの本技術の適用可能性について議論し、4.8 節で本章の結論を述べる。

#### 4.1.1 伝送路システムの現状と要件

- ・ アンプ入出力点にファイバーモニタ機器を設置するか、機器が設置されている箇所に工事担当者を派遣して測定
- ・ 独自のOSCをWDM信号に重畳して自律制御



(a) 従来の伝送路システム



(b) DCXサービスに求められる要件

図 4.1 従来の伝送路システムの課題と DCX のサービス要件

図 4.1 の (a) は従来の伝送路システムを示す。伝送路システムの最適化を行うためには各スパンで発生するスパンロスモニタする必要があるが、従来技術である OTDR は、自身から送り出した光パルス信号が光ファイバ内で反射して戻ってくる光の量からスパンロスを算出する [86]。一方で商用で広く活用されている光ファイバーアンプの EDFA は、逆方向の信号光が EDFA の性能や安定性に悪影響を与えるのを防ぐため、光を一方向にのみ通過させる光学素子であるアイソレーターが内部に実装されている。このため、OTDR を使ったスパンロス測定は EDFA を越えて実施できず、ROADM やアンプなどの装置ごとに OTDR を設置するか、あるいはこれらの機器が設置されている箇所に工事担当者を派遣して測定する必要がある。

ところが、ROADM やアンプは (a) に示すようにベンダ独自仕様の Optical Supervisory Channel (OSC) を用いて、ベンダ各社それぞれの手法で自律制御・最適化するのが一般的となっている。OSC の標準化については、OSC チャンネル用に使用する波長等、ごく一部の規定しか成功しておらず、現状では異ベンダ装置を相互接続して自律制御・

最適化することはハードルが高く、(b) のようなユースケースに対応するには、様々な装置に適用可能なオープンで新しい技術・設計手法が必要となる。

一方、学術分野では 1.1.2 節に示した GN モデルをベースとした新しい伝送路設計手法が広まり、GNPy や Mininet-Optical などのオープンな光ネットワークツールが開発されてきた。文献 [22] では、GNPy モデリングがオープン光ネットワークにおける光 WDM レイヤーのデジタルツインを実現する上で信頼性をもって使用できるとし、様々な研究機関によるトライアルの結果を報告している。図 4.2 は GNPy による光ネットワークのデジタルツインのイメージを示す。ハイライトされた光 WDM パスには、ROADM と伝送路システム (Optical Line System: OLS) の交差部分で計算されたメトリクスが示されている。GN モデルに基づき、ファイバーの種類やアンプの利得

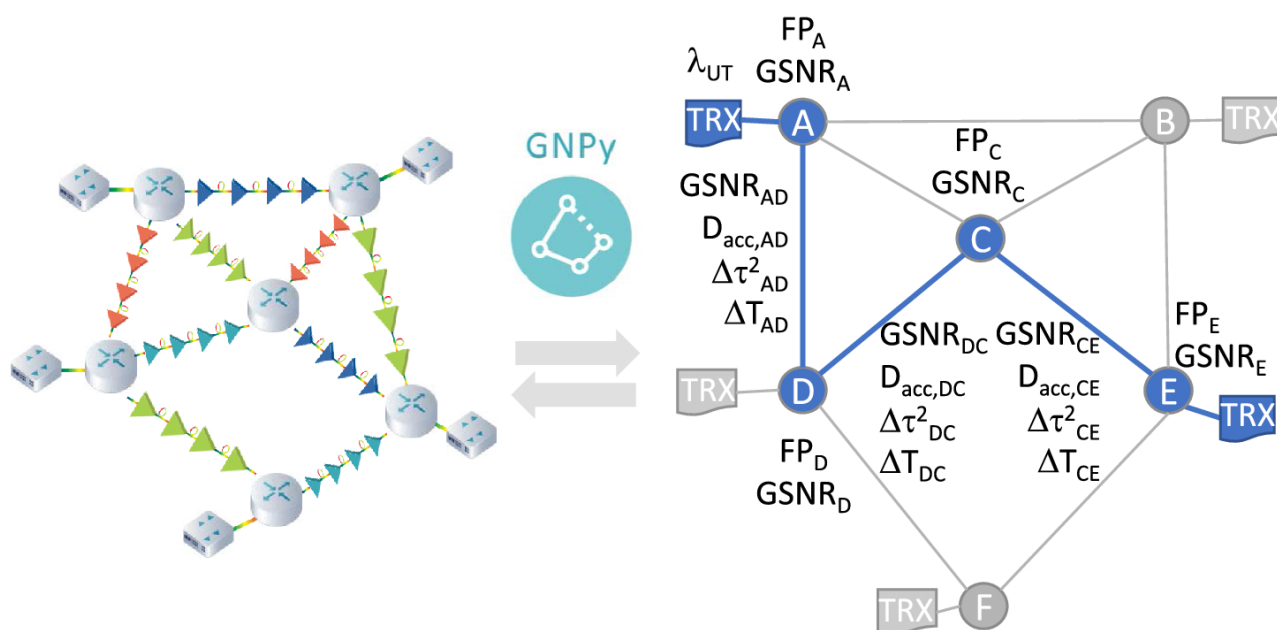


図 4.2 GNPy による光ネットワークのデジタルツイン (出典: <https://doi.org/10.1364/JOCN.452868>)

など、光ネットワークシステムの特徴パラメーターをこれらのツールに入力することで、少ない計算リソースで QoT を解析的に推定することができると期待されている。また、近年注目を集めている ML は多くの科学・工学分野に革命をもたらし、驚異的な成功を収めていることから、この 10 年の間に ML による光ネットワーク運用の自動最適化手法が学術・産業の両分野から多数報告されている。例えば文献 [87] では、人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) ベースの ML モデルを WDM システムの QoT 推定に適用し、ニューロン数・活性化関数・層数を最適化することで高い QoT 推定精度を実現している。

しかし、何年にもわたって多くの研究が行われたにもかかわらず、これまでに自動運用は商用光ファイバーネットワークにおいて広く受け入れられているとは言えず、現在も図 4.1 の (a) に示した従来の伝送路システムが導入され続けている。Khan は、ML を商用ネットワークで利用する際の問題点を文献 [88] に示した。Khan が挙げた問題点をベースにして、ML による光ネットワークの自動運用における課題をオペレーターの観点から分析すると以下のようになる。

- 多くの機械学習モデルは膨大な数のパラメーターを持ち、それらが複雑に相互作用する。このため、個々のパラメーターやレイヤがどのように予測に寄与しているのかを解釈するのが困難であり、結果を単純に「原因と結果」として説明できない場合がある（透明性と説明可能性）。
- モデルはデータからパターンを学習するため、モデルが訓練されたデータ環境と実際に運用される環境が異なる場合、モデルは期待通りに機能しない可能性がある（汎用性・一般化）。

DCX オペレーターはユーザーとのサービス・レベル合意（Service Level Agreement: SLA）に基づき、ネットワーク・サービスの品質を保証しなければならない。障害が発生した際、場合によっては事業者は障害の根本原因と場所を特定し、ユーザーに報告しなければならない。また、ブラックボックス的なアプローチを採用した場合、時間的変化やリンクの変更、データや機器タイプ・ベンダの変更に敏感であるため、多種多様な伝送路システムを含み、オンデマンドにサービス提供を可能とする DCX サービスの要件を満たすことは難しいと言える。

DCX サービスを実現するために実用的・効率的に伝送路システムを構成する際には、CAPEX・OPEX 等のコストに関する課題も重要である。

- 多くの論文はネットワーク内に波長チャンネルモニター等の高価な測定器を多数設置することを前提としているが、新たに設置される機器、拡張されたツールセットの使用、自動運転のための追加労働力などの自動化技術導入によって発生するコストは、それらを上回る利益によって補われなければならない（コスト制約）。

既存運用からの移行シナリオも重要な要素と言える。例えば車の自動運転においては、自動化のレベルに応じてレベル1～5が定義されており、レベル1～2はドライバーによる監視に基づく自動化を、レベル3以上からシステムによる監視に移行し、レベル5で完全自動運転となる [89]。これは、技術の普及において安全性や法規制を確保しながら、消費者と社会の信頼を得るために欠かせないステップであり、社会インフラを支えることを期待される DCX サービスにも同様のステップが要求される。

- 光伝送エンジニアは、既に確立された従来の自動でない方式を熟習しており、これを日々実施している。新技術・新方式を導入するためには、既存の運用からの移行のシナリオを示す必要がある（従来手法への適用性）。

最後にもう一つの深刻な課題として、サーバー系技術者や L2/L3 等のネットワーク技術者に比べて光伝送を専門とする技術者の絶対数が少ない点が挙げられる。労働人口減少が深刻化する中で DCX サービスの提供規模・地域を拡大していくためには、デジタルツイン等の将来の技術・運用方式に適合してサービスの継続性を保証する必要がある。

- 新しい自動化技術・運用方式に適合し、限られた数の専門技術者によって遠隔から広範囲の伝送路システムの設定・最適化を実施可能とする必要がある（運用者数の制約）。

上記の課題を考慮した上で、DCX サービスの提供に向けて、システムベンダに依存しない共通のかつ自動の伝送路モニタ・パラメータ推定技術の要件を抽出すると、以下の様にまとめることができる（1.2.0.3 節再掲）。

#### 既設ベンダ以外の装置を用いて新設の伝送路システムを構築したいケースに対応

ブラックボックス的なアプローチでなく、物理モデルに基づく伝送路設計に必要な全てのリンクパラメータの推定ができ、機器タイプやベンダの変更に對しても汎用性があること

#### 品質やパラメータが不明な回線を使った提供

専門技術者の派遣や追加ハードウェアなしにスパン毎の伝送路品質（QoT）を遠隔からモニタして最適化・設定できること

#### 従来運用手法に適合しつつ、迅速にプロビジョニングや不具合切り分けを実施

不具合が発生した際に工事担当者がそれを目視で確認でき、予期せぬ問題が発生した場合に操作を元に戻せること、工事実施後（5時間）もシステムが安定して動作し QoT が変動しないこと

続いて関連する研究の状況を述べる。本節で示したように、Khan は ML を商用ネットワークで利用するための課題をまとめた [88]。この論文では、伝送装置と別に備えた Optical Performance Monitor (OPM) からのデータに依存するのではなく、DLM のように、デジタルコヒーレント受信機を通して利用できる豊富な監視データの適用について簡単に触れている。しかし、この論文では DLM を適用するためのアーキテクチャや実験結果は示されていない。

DLM 単独の研究としては、多くの実験が [20] に記述されており、ここではロス・波長分散・ゲイン・フィルタ応答などのモデルパラメータを推定し、DLM を適用してファイバー・アンプ・フィルタのマルチスパン特性を可視化している。しかし、[20] ではフィールドトライアルは実施しておらず、伝送路システムのプロビジョニング手法（実行時間・アンプなどの機器の最適化手法含む）については検討されていない。

これまで、アンプを含む伝送路システムの物理モデルパラメータをキャリブレーションすることで、QoT 推定精度を改善する Optical Line System (OLS) キャリブレーションが提案された [90]。この論文では伝送路システムの最適化手法や OSNR 推定結果の精度は示されているが、QoT 推定と最適化を検証するための GSNR 推定結果を用いた BER 解析は行われておらず、Power Profile は既知であることを前提としており、自動的に推定する方法については述べられてない。また、フィールドでの検証結果も報告されていない。

以上のように、これまでの研究では、伝送路システムをシステムベンダに依存せずに共通のかつ自動で伝送路モニタ・パラメータ推定するためのアーキテクチャ・モデル・モニタ技術はまだ示されていない。また各技術が個別に実験室内の理想的な環境で検証された結果のみが報告され、これらの技術を組み合わせてフィールドで実証した結果は示されていない。

## 4.2 適用方式

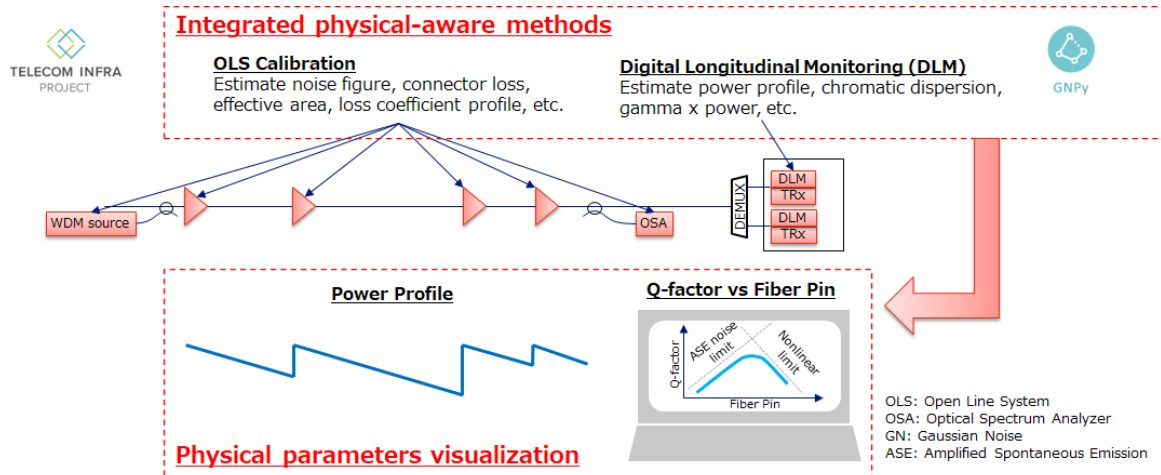


図 4.3 Integrated physical-aware method による物理パラメーターの可視化

図 4.3 は本論文で提案する方式の概要を示す。この方式では、伝送路パラメーター推定のための 2 つの主要な物理レイヤ認識のための技術を統合して活用するところに特徴があり、これらは光回線のプロビジョニングにおいて、DLM、OLS キャリブレーションの順に実行される。各技術は、データ収集と物理パラメーター抽出の 2 つの異なるステップで実行される。

### 4.2.1 Digital longitudinal monitoring 技術の適用

1.1.3.2 節で紹介した DLM は、ファイバー長手方向に沿った複数の伝送路コンポーネントの物理的特性を可視化する光送受信機ベースのモニタリング技術であり、特別なモニタ用ハードウェアを要せず、受信したデータ伝送信号を処理するだけで実現できるところに特徴がある [20]。DLM によって推定されるパラメーターの中でも、縦方向の光パワーはリンク内に存在する複数の損失を特定し、ファイバーパラメーターの抽出を可能にするため、伝送路システムの最適化において特に重要である。DLM はファイバーの非線形係数と縦方向光パワーの積  $\gamma(z)P(z)$  を推定する [91]。また、ファイバースパン長だけ予め分かっている場合、縦方向のパワープロファイルで示される EDFA の位置を較正することで、スパンごとの CD パラメーターを推定することもできる。本方式はまず初めに、DLM を用いてデータ収集を行い、パラメーターを抽出する。DLM 信号が E2E パスに沿って、AAL 及びキャリアリンクに敷設された光回線を通る。この信号の出力パワーは、DLM が適切な精度と分解能を達成できるレベル（およそ 12 dBm）に設定する。このパワーは比較的高く、強い非線形性が予想されるため、このステップでは DLM チャンネルのみが伝送される。ここで DLM チャンネルにはリアルタイムデータは送信されない。この論文では、特に [92] に記述されているように、DLM のための線形最小二乗アルゴリズムを使用し、 $\gamma(z)P(z)$  の絶対値を迅速に推定できるようにしている。ファイバースパンの長さ  $L_S$  が予め分かっている場合、DLM を通して収集されたデータを使用して各ファ

イバースパンごとに抽出されるパラメーターは、DLM 周波数における損失係数  $\alpha$ 、波長分散  $D$ 、集中損失の位置と値  $l(z)$ 、非線形係数  $\gamma$  およびファイバースパン入力電力  $P$  の積となる。後者は EDFA 出力点にある PD で測定されたパワーと入力コネクタ損失の積に相当する。次のステップである OLS キャリブレーションにて、入力コネクタ損失と各ファイバースパンの実行断面積の推定が行われるので、これを使って  $\gamma$  と  $P$  を分離することができる。

#### 4.2.2 Optical line system calibration の適用

敷設された伝送路システムに対し、伝送路システムの QoT を最適化するためのテレメトリ技術 [90] を初めに実施する。光ファイバーアンプに内蔵された光パワーモニタと、光回線の両エッジノードに設置した 1 つの光スペクトラムアナライザー (Optical Spectrum Analyzer: OSA) のみを使用して物理パラメーターを抽出する。求めた物理パラメーターを GNP<sub>y</sub> のような物理シミュレーションモデルに適用することで、最適なワーキングポイントを得ることができる。ASE 光源と WSS の組み合わせにより、最初のエッジノードにフル C バンド WDM 矩形波を作成し入力する。WSS は ASE 光源を平坦化し、OSNR 測定を行うための任意パターンのスペクトルホールを形成する。データ収集は、対応するスペクトラムと EDFA それぞれの入出力電力を測定しながら、キャリアリンクの各 EDFA のゲインとチルト設定を変更することで行われる。次に各スパンについて、損失係数関数  $\alpha(f)$ 、入力  $l(z=0)$  と出力  $l(z=L_S)$  点でのコネクタ損失、およびゲインパラメーター・NF に関する平均 EDFA 雑音指数 NF (周波数に対してフラットと仮定) の関数をパラメーターとして取得する。全体的な利得リップルプロファイルの推定は、すべての EDFA が同じ固有利得リップルプロファイルを示すという仮定に基づいている。実行断面積  $A_{eff}$  は、非線形係数  $\gamma$  から間接的に導かれる。DLM は、 $\gamma(z)P(z)$  として表される相対電力プロファイルを推定して出力する。各ファイバースパン入力  $z=0$  での  $P(z)$  の値は、EDFA 出力電力と入力コネクタ損失との積  $l(z=0)$  として推定することができる。非線形係数  $\gamma$  が単一のファイバースパンにおいて一様であると仮定すると、入力コネクタ損失を推定することで、非線形係数、続いて実行断面積を導出することが可能となる。物理パラメーター抽出は、信号電力と OSNR のそれぞれについて、測定プロファイルとシミュレーションプロファイルの平均誤差に関するコスト関数を最小化する物理パラメーターセットを決定することで実現している。このように DLM と OLS キャリブレーションを組み合わせることで、ファイバーとアンプの包括的な特性評価が可能になる。DLM と OLS キャリブレーションによって得られた物理パラメーターを GNP<sub>y</sub> シミュレーションモデルに入力することで、全 WDM チャンネルに対する GSNR を推定することができる。TRx の BER 対 OSNR 特性 [77, 93] を利用し、伝送路システムと TRx によって生成されたインペアメントの合計値を計算し、受信機における前方誤り訂正 (FEC) BER に対応する Q ファクタを推定することができる [94]。

Integrated physical-aware method により、オペレーターはマージン設計や性能最適化など、ネットワーク運用に必要な情報を可視化することができる。DLM と OLS キャリブレーションを組み合わせた最適化手法と GN 近似を用いた解析的物理モデリングにより、計算時間が大幅に短縮され、計算結果をオペレーターに即座に表示することが

できる。また本方式はブラックボックス的なアプローチではなく、かつ機器タイプやベンダによらず適応可能な技術である。このため提案する手法を適用することによって、4.1.1 節に示した要件のうちの「既存ベンダ以外の装置を用いて新設の伝送路システムを構築したいケースに対応」を満たすことができる。

#### 4.2.3 QoT 推定と測定

[94] で述べた手法に従って、以下に伝送チャネルの実効 E2E SNR がどのように測定され、物理モデル（この場合は GNP<sub>y</sub>）の予測とどのように比較されるかを以下に示す。特定の変調フォーマット（Modulation Format: MF）が与えられた時、測定された Pre-FEC BER は、E2E 光パス全体の SNR の関数として下記のようにモデル化することができる：

$$\text{BER} = \Psi_{\text{MF}}(\text{SNR}) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{SNR}^{-1} &= \text{SNR}_{\text{TRx}}^{-1} + \text{SNR}_{\text{ASE}}^{-1} + \text{SNR}_{\text{NLI}}^{-1} \\ &= \text{SNR}_{\text{TRx}}^{-1} + \text{GSNR}^{-1} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで 16QAM の場合は下記に従う。

$$\Psi_{\text{MF}} = \frac{3}{8} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{\text{SNR}}{10}} \right) \quad (4.3)$$

Back-to-back の BER 対 OSNR 測定曲線から、最小二乗法によって TR<sub>x</sub> の実効 SNR<sub>TRx</sub> を導出することができる。E2E SNR を推定するために、GNP<sub>y</sub> モデルはまず光回線における ASE 雑音と NLI 雑音に関する影響を足し合わせた GSNR を推定する。予測された E2E SNR は、式 (4.2) に従い、TR<sub>x</sub> の SNR による影響を考慮して算出される。BER 測定を使用して推定精度を検証するため、E2E 接続の SNR は式 (4.1) を反転して計算される：

$$\text{SNR} = \Psi_{\text{MF}}^{-1}(\text{BER}) \quad (4.4)$$

SNR<sub>TRx</sub> に関する TR<sub>x</sub> の正確な性能を開示することを避ける目的<sup>\*18</sup>で、推定および測定された SNR を任意の値で減算して、テスト対象チャネルの相対 Q 係数を求める。

### 4.3 制御アーキテクチャ

本節では、4.2 節で示した適用方式を活用した制御アーキテクチャについて論ずる。

図 4.4 は、新しく考案された DCX アーキテクチャの重要な実現要素の 1 つである、ハイブリッドコントローラーを示している。ユーザー・サイトは、キャリアが所有するキャリア・リンクと接続し、キャリアはキャリアのエッジに POP を提供する [94]。ユーザー機器は、AAL を介して POP に接続することができ、電気変換なしに他のユー

\*18 本論文では、TR<sub>x</sub> ベンダにとって秘匿情報である特性情報を示す必要がある場合は、絶対値ではなく相対値で特性を表記している。

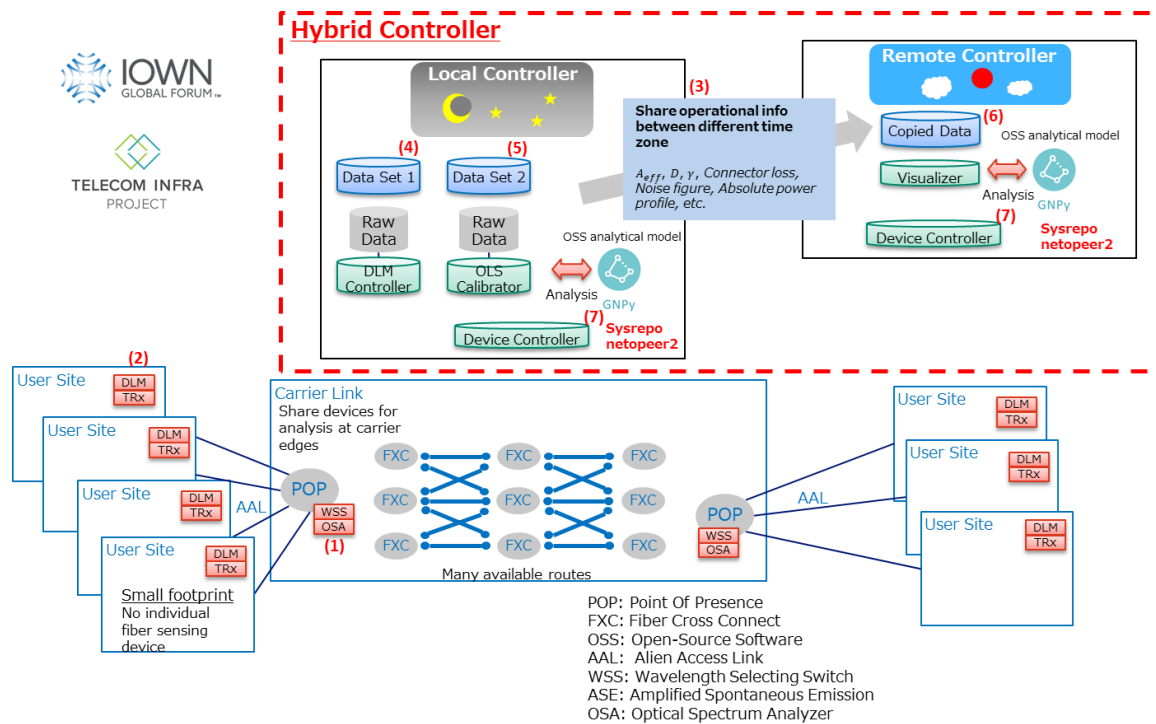


図 4.4 DCX アーキテクチャ中のハイブリッドコントローラー

ザー機器に直接接続することができる。このサービスでは、光スイッチ (Fiber Cross Connect: FXC) が配置されたキャリアリンクを介して多数のユーザーが互いに接続するため、図中 (1) のようにキャリアエッジに配置された解析用の装置 (WSS, OSA 等) をユーザー間で共有することができる。また、(2) のように DLM をユーザー機器に適用することで、ユーザーサイトに新たな監視用装置を追加することなく、ファイバーリンクの物理パラメーターを取得することができる。OSS による解析モデルとマルチベンダ機器制御用の共通 IF を備えたハイブリッド・コントローラー (ローカル/リモート) アーキテクチャの適用により、オペレーターはビッグデータを共有することなく、(3) のように異なるタイムゾーン間で共通の操作手順を実行することができる。このアーキテクチャの特徴は、解析モデルやマルチベンダ機器操作に OSS を利用することで、世界中どこでも同じ解析や機器制御が可能であることと、大容量のデータ、または計算時間への影響が大きい測定データはローカルサイトのみに保存されることである。ハイブリッドコントローラーは、DLM コントローラー、OLS キャリブレーション、ビジュアライザ、デバイスコントローラーの 4 つの主要コンポーネントから構成される。ローカルサイトの DLM コントローラーは、Muxponder 上の DLM 機能を使って 130 Gbaud クラスの DSP ASIC から波形データを取得する。DLM によって抽出された物理パラメーターは、処理後にデータセット 1 として保存される (4)。同様に、OLS キャリブレーションは WSS、光ファイバーアンプ、OSA を制御して測定を行う。その後、測定データを処理することで物理パラメーター抽出を行い、データセット 2 として格納する (5)。リンク伝送のモデリングと QoT 性能の最適化と可視化には、ローカルサイトの GNPpy を利用する。図 4.8 に後述するように、可視化に必要なすべての物理パラメーターは、データセット 1 とデータセット 2 を利用して、DLM + OLS キャリブレーションによって計算される。これらのパラメーターはリモートコント

ローラーにコピーされる (6)。ここでは、操作のための物理パラメーターはコントローラー間で共有されたが、DLM のために DSP から抽出され、OLS キャリブレーションの過程で生成されたデータはローカルコントローラーに保存される (待ち時間を最小限に抑えるためだけでなく、これらの技術データは関連する事業者間で秘密保持契約に基づいて取り扱われることもあるため)。リモートサイトのオペレーターは、可視化に必要な全ての物理パラメーターを GNP<sub>y</sub> に入力することで、伝送路システムを設計することができる。最後に、デバイスコントローラーは、伝送路システム切り替えのための FXC と TRx の設定を行う (7)。ここで、TRx の共通制御 IF は、OpenROADM [25] のような MSA ですでに定義され標準化されているが、FXC の IF はまだ定義されていない。FXC の制御 IF はベンダごとに異なるため、今回のようにリモートコントローラーからローカル機器を制御するためには、共通の IF が不可欠である。そこで、[16] で定義した FXC 用の共通制御 IF を利用し、[16] で開発したコントローラーを伝送路システム

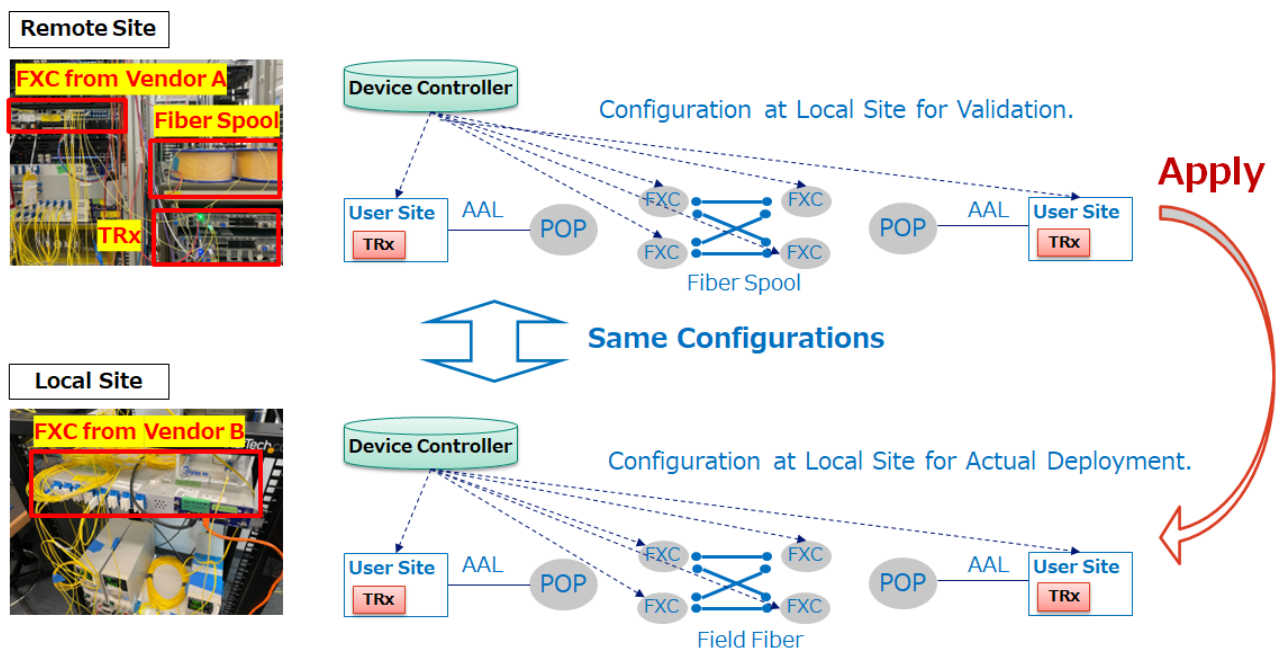


図 4.5 デバイスコントローラーによる検証と伝送路システム設置作業

切り替え用に拡張した。これらを使用することで、図 4.5 に示すように、リモートサイトのオペレーターは、マルチベンダの FXC と TRx を使用した伝送路システムをローカルサイトで検証することができる。オペレーターは新たに設置した伝送路システムでサービスを開始するかどうかを検証し、切り替え実施の判断を行う。

本節で論じたように、解析モデルは OSS の GNP<sub>y</sub> を、共通制御 IF とデバイスコントローラーは YANG ベースのデータストア Sysrepo と NETCONF サーバー netopeer2 の OSS を利用しているため、コントローラーは世界中どこでも使用でき、4.1.1 節に示した要求条件、地域を限定しないオープンで高度な設計を実現できる。

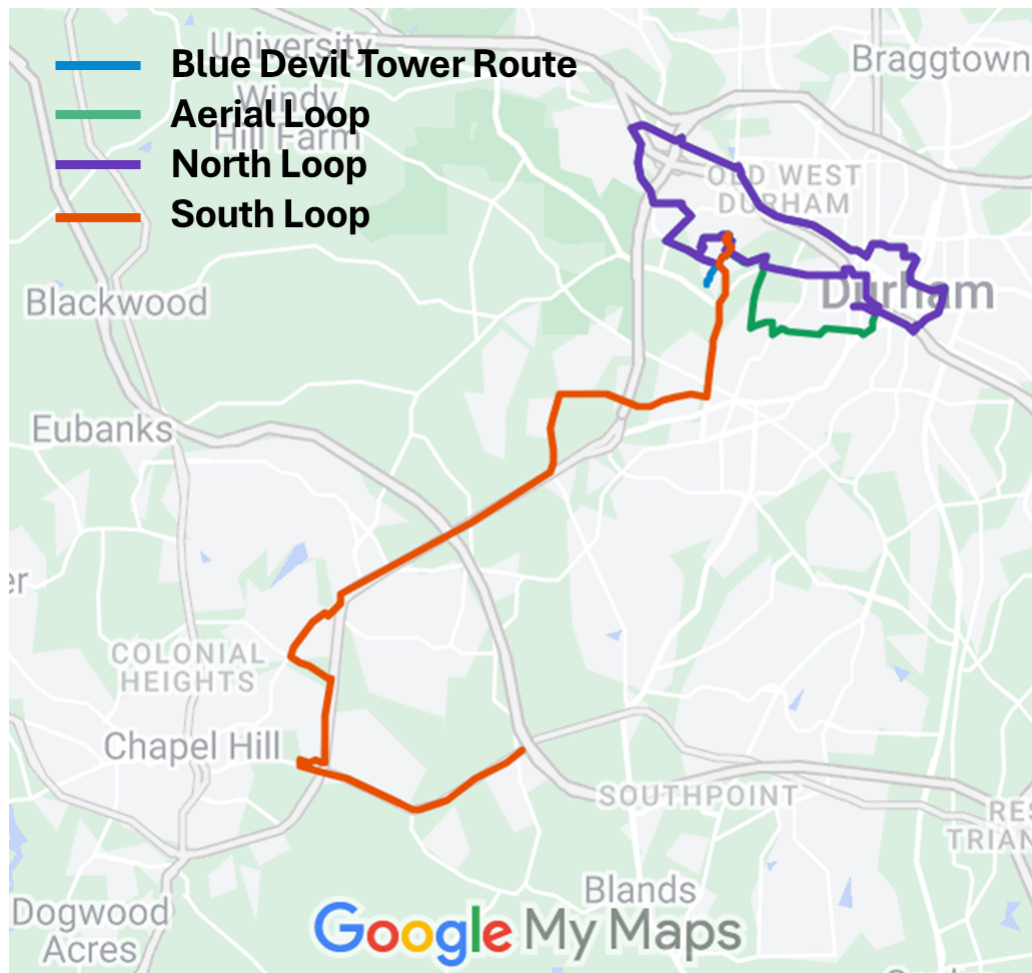
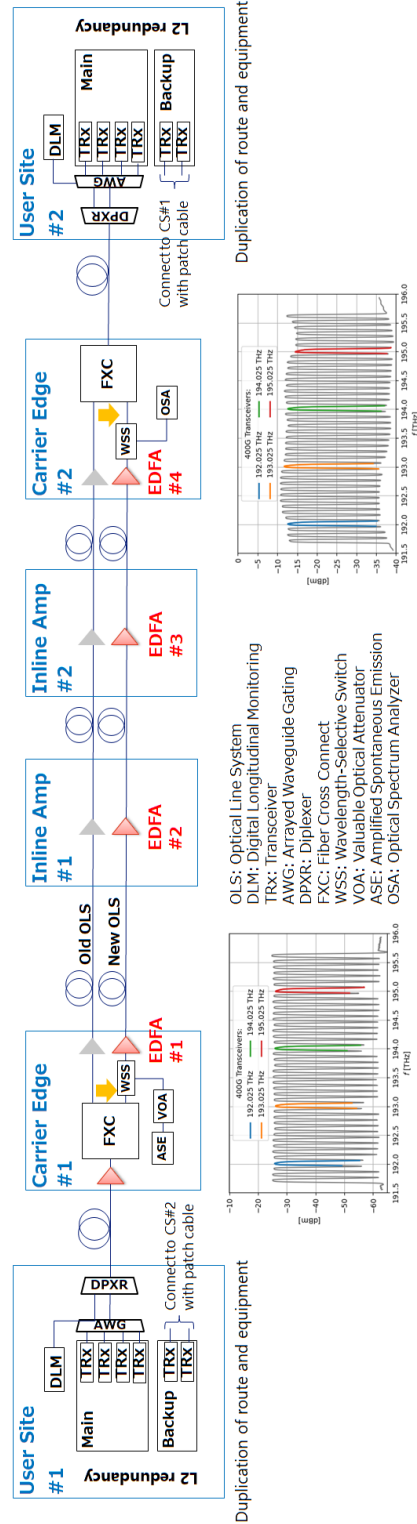


図 4.6 ファイバー構成

#### 4.4 実験構成

図 4.6 は、フィールドトライアルで使用したリンクファイバーのルートと構成を示す。すべてのフィールド・ファイバー（North・Aerial・Blue Devil Tower・South の各ループ）は、デューク大学の Telecom building を始点と終点とするシングルモード・ファイバーで構成される。長さ 2.29 km の架空区間を含む Aerial ループを除き、すべてのファイバー・ルートは埋設ファイバーである。ブルーデビルタワー（BDT）ループと South ループにはループバック（青枠）を適用した。DCX ネットワーク用の E2E ファイバールートは、フィールドファイバーとラボファイバースプールを使用して構築した。AAL1 は長さ 15.3 km で、3 つの 5.1 km ファイバーループ（BDT ループを 3 回）で構成されている。キャリアリンクは長さ 163.0 km で、South ループ・North ループ（2 回、ループバック接続）・Aerial ループ（2 回、ループバック接続）で構成されている。AAL2 には 20 km のスプールファイバーを使用した。次に、新たに導入した伝送路システムを短期間で最適化するためのネットワーク構成を図 4.7 に示す。ここでは、DCX ユーザーは経路と Muxponder を二重化した L2 冗長制御を適用し、L1 冗長制御は適用しないものとした。このようなネットワーク構成により、メインの Muxponder 間に敷設された（これまで利用していた）伝送路システム



Duplication of route and equipment

OLS: Optical Line System  
 DLM: Digital Longitudinal Monitoring  
 TRX: Transceiver  
 AWG: Arrayed Waveguide Gating  
 DPXR: Diplexer  
 FXC: Fiber Cross Connect  
 WSS: Wavelength-Selective Switch  
 VOA: Variable Optical Attenuator  
 ASE: Amplified Spontaneous Emission  
 OSA: Optical Spectrum Analyzer

図 4.7 ネットワーク構成

を、限られた時間で新設の伝送路システムに切り替える。ユーザーサイト 1 と 2 にあるバックアップの Muxponder は、バックアップリンクを模擬するためにパッチケーブルで接続した。メインの Muxponder には、C バンド全体で 1 THz の周波数間隔の TRx を 4 つ実装した。この 4 つの周波数は、固定 100 GHz 間隔の AWG で多重化した。TIP の Phoenix 要件 [69] に準拠した Muxponder を配備し、2 章で示した Cloud-native なアーキテクチャを採用した

NEC の NOS をインストールした。これらの Muxponder には、富士通オプティカルコンポーネンツと Lumentum による OpenROADM 準拠の 400G CFP2-DCO プラガブル TRx を搭載した。本実験では、DLM 実証用に市販の Muxponder を活用した。DLM チャネルの帯域幅（130 GBd クラス）が広く、今回活用した AWG に収まらないため、DLM 信号をダイプレクサ（DPXR）で多重化し、400G の 4 チャネルと合波した。DLM 機能は将来的に TRx 内に実装し、ユーザー DC で必要となるスペースを最小化する予定である。キャリアエッジ 1 と 2 には、従来敷設されていた伝送路システムから新設の伝送路システムに光パス経路を切り替えるために FXC を設置した。伝送路システムの起点となるキャリアエッジ 1 には ASE 光源と WSS があり、キャリアリンク上に 100 GHz 間隔の 400 Gbit/s チャネル 4 本を含む合計 40 チャネル（DLM チャネルは 200 GHz スロットを占有）のフル C バンド DWDM 伝送スペクトルを生成した。終点であるキャリアエッジ 2 には、スペクトルを測定するための WSS と OSA を設置した。図 4.7 の挿入図は、全てのパラメーター推定ステップが終了した後、キャリアエッジ 1 および 2 の OSA によって測定された WDM スペクトルを示す。色付きのチャネルは 4 つの 400G リアルタイム・データ・チャネルを示し、灰色のチャネルは ASE 光源と WSS によって模擬されたチャネルである。このように生成されたスペクトルは、全スペクトル負荷状態での標準的なネットワーク動作に相当する。キャリアエッジと 2 つのインラインアンプ（1 と 2）の EDFA はすべて、Auto Gain Control（AGC）付きのデュアルステージを適用した。DLM 計算では、空間粒度を 1 km に設定し、信号サンプルを使用した。

1.2.0.3 節にて、自動化・最適化に必要なハードウェアの追加を最小限（伝送路システム当たり 1 式程度）に抑えることを要件とした。今回の方式では、DLM 機能は将来的に TRx 内に実装することを想定しており、ユーザー DC で必要となるスペースを最小化できる。また本方式では、EDFA ごとに Optical Channel Monitor (OCM) や OTDR 等の追加ハードウェアは必要なく、キャリアエッジ 1 と 2 で ASE 光源・WSS・OSA を作業時間のみ適用（別工事とシェア可能）であり、伝送路システム当たり 1 式以内の目標を達成できる。

## 4.5 実験結果：1 時間以内でのプロビジョニングとメンテナンス

本節では、実行時間、物理パラメーターの可視化、性能検証、ベースライン比較、システムの Q ファクタ変動、運用上の考察を含む、1 時間以内でのプロビジョニングとメンテナンスの達成結果を報告する。結果を読みやすくするために、以下の数学的表記法を導入する。任意の周波数依存プロファイルを考慮する場合、周波数全体の平均値として表す。誤差演算子は、測定値とシミュレートされたメトリック値の差を定量化し、周波数スペクトルにわたる標準偏差として表す。

### 4.5.1 時間測定結果

図 4.8 は、プロビジョニングの手順と実行時間を示している。この図には、作業手順だけでなくデータ生成と可視化のプロセスとそれらの相互関係も記載している。T0 と Tf はそれぞれ開始時間と終了時間を示す。まず DLM を用

## Working steps      Data generation      Visualization

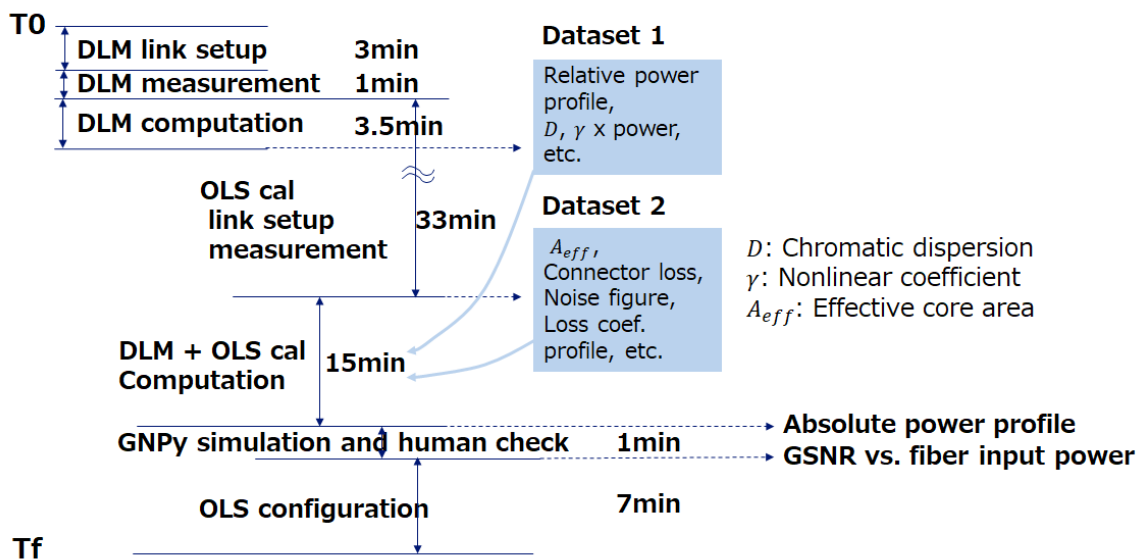


図 4.8 プロビジョニング手順と実行時間

いてファイバーパラメーターを抽出した。リンクのセットアップには、コヒーレント・モジュールの起動を含めて 3 分、測定には 1 分かかった。DLM 測定の後、DLM 計算と OLS キャリブレーションのセットアップ・測定が並行して行われ、それぞれ 3.5 分と 33 分を要した。DLM 計算によりデータセット 1 が生成され、OLS キャリブレーションの測定結果が OLS キャリブレーション計算ステップに渡され、リンクパラメーターが抽出され、データセット 2 が生成される。その後、GNPy モデル計算の入力としてデータセット 1 とデータセット 2 を組み合わせ、チャネル入力パワーに対する絶対パワープロファイルと相対 Q ファクタを含むリンク特性を可視化した。可視化した結果を得るには、OLS キャリブレーション測定後 15 分かかったが、これはほとんど OLS キャリブレーション計算についやされた。パラメーター抽出タスクの実行には、クアッドコアの第 11 世代 Intel Core i5-1135G7 (2.40 GHz、1382 MHz)、32GB RAM を適用した。リモートオペレーターが、物理パラメーター対応モデルが提供する可視化されたデータをチェックして、新しい伝送路システム構成を採用するか古い構成に戻すかを判断する時間を 1 分間とした。最終的な伝送路システムコンフィギュレーションは 7 分で完了するため、タスク全体はトータル 1 時間以内に完了する。

本方式では、1 R 中継地点等、伝送路システムが設置されている拠点に対して工事担当者を派遣する必要がなく、リモートから自動でモニタ・最適化・設定が可能である。また、ユーザーが許容するメンテナンスウインド（通常は 2 時間程度）に対して 1 時間以内に完了可能であることを実証し、4.1.1 節に示した現地派遣削減と工事時間短縮を達成することができた。

### 4.5.2 物理パラメーターの可視化

図 4.9 は、図 4.6 に示したファイバー構成で、DLM によって可視化した相対パワープロファイルである。縦軸と横軸は、それぞれ相対パワー ( $\gamma P$ ) を dB 単位と距離単位で示す。DLM による結果は OTDR のトレースとよく一致

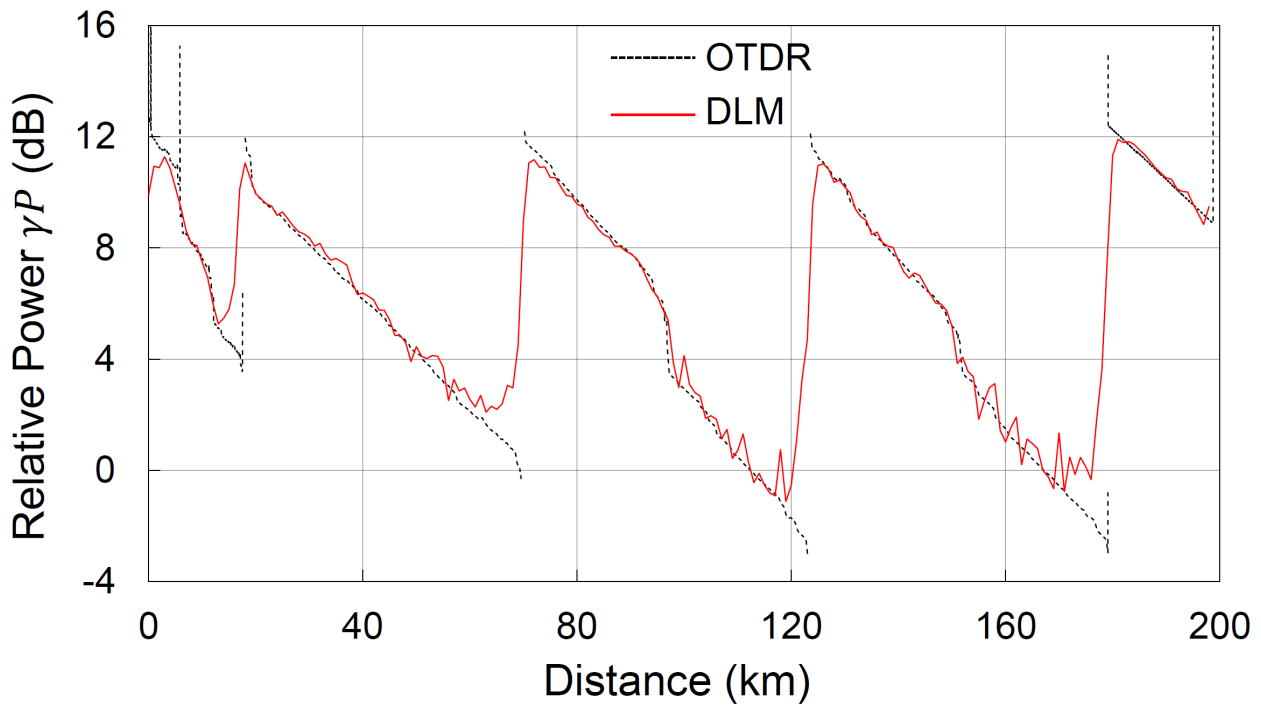


図 4.9 DLM によって推定された相対出力プロファイル

| Span ID | $L_S$<br>[km] | $A_{eff}$<br>[ $\mu m^2$ ] | $D$<br>[ps/nm/km] | $\gamma$<br>[1/W/km] | Total Loss<br>[dB] | $l(z)$ [dB] |               |           |
|---------|---------------|----------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------|---------------|-----------|
|         |               |                            |                   |                      |                    | $z = 0$     | $0 < z < L_S$ | $z = L_S$ |
| AAL 1   | 17.6          | 82.2                       | 17.94             | 1.28                 | 11.7               | 2.7         | —             | —         |
| CL 1    | 51.86         | 90.84                      | 17.97             | 1.16                 | 15.7               | 3.33        | 2.25          | 0.93      |
| CL 2    | 54.75         | 91.92                      | 17.35             | 1.15                 | 16.8               | 2.73        | 2.40          | 0.89      |
| CL 3    | 54.75         | 95.67                      | 17.67             | 1.10                 | 16.4               | 2.57        | 1.28          | 0.62      |
| AAL 2   | 20.0          | 83.0                       | 16.71             | 1.27                 | 5.0                | 1.7         | —             | —         |

表 4.1 フィールドトライアルの物理パラメーターのセット。キャリアリンクに関連する物理パラメーターは、OLS キャリブレーションを使用して抽出した。AAL に関する物理パラメーターは、DLM 技術と OLS キャリブレーションの結果を組み合わせて導出した。

し、OTDR トレースと DLM の間の RMS 誤差は 0.45 dB であった（RMS 誤差の計算からアンプの位置は除外した）。また、DLM によってフィールド・ファイバー中に存在するロスも観察できた。

表 4.1 に、今回の手法で取得した各スパンの物理パラメーターのセットを示す。AAL のファイバー物理パラメーターは、DLM 技術に EDFA のパワーモニタ測定結果を組み合わせて取得した。続いて図 4.10 にキャリアリンクのターゲットゲイン  $G$  とチルト  $T$  の設定に対する雑音指数曲線を示す。両方の AAL における EDFA の平均雑音指数値は 6.5 dB と推定した。図 4.11 は、取得した一連の物理パラメーターを GNP<sub>y</sub> に入力し、EDFA の構成をゲインとチルトを変えて 58 回測定するキャリブレーション手順を通して得られた信号電力  $P_{SIG}$  および OSNR の精度を示す。抽出された物理パラメーターにより、図 4.11 (a)、図 4.11 (b)、図 4.11 (d) に示すように、それぞれ信号電力の平均  $\overline{P_{SIG}(f)}$ 、リップル  $P_{SIG}(f) - \overline{P_{SIG}(f)}$ 、OSNR の平均  $\overline{OSNR(f)}$  について精度よくモデル化できていることが分かる。一方図 4.11 (c) の OSNR リップル  $OSNR(f) - \overline{OSNR(f)}$  は、標準偏差の大きい部分（図 4.11 (c) の斜

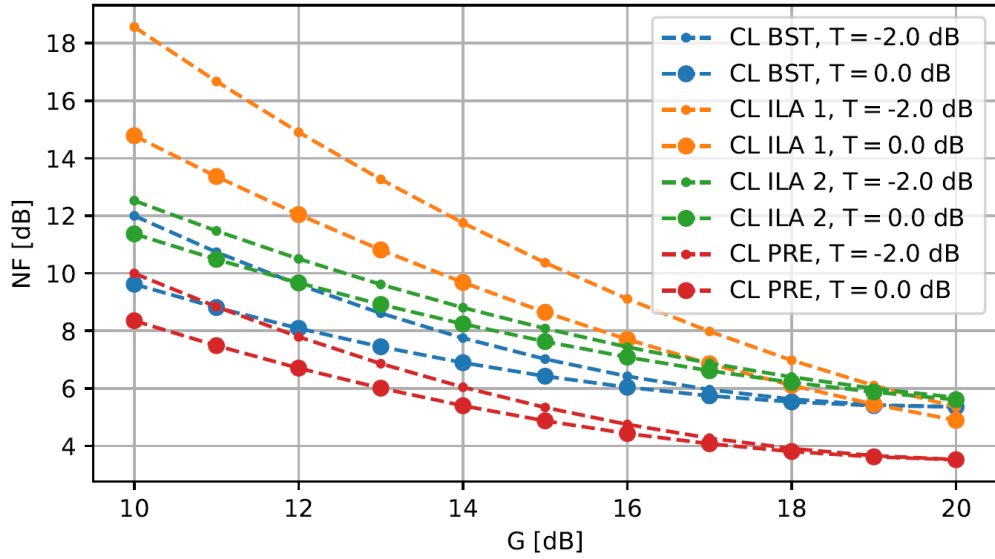


図 4.10 EDFA 雑音指数対キャリアリンクのターゲットゲイン/チルト曲線 (Booster-amp (BST), In-Line Amp (ILA), Pre-amp (PRE))

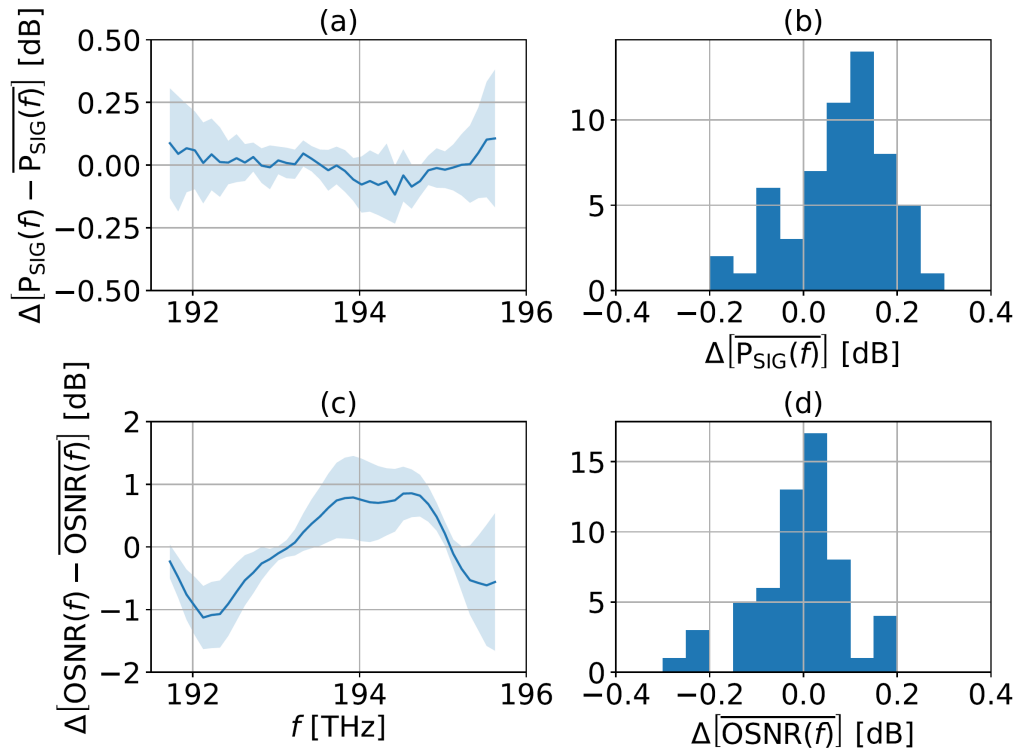


図 4.11 収集されたデータセットによる信号電力と OSNR の精度：(a) 信号電力リップル誤差、(b) 信号電力平均誤差、(c) OSNR リップル誤差、(d) OSNR 平均誤差

線部分) で示される特定の領域で変動があり、周波数に変動誤差がある。これは、このモデルが雑音指数の周波数変動を考慮していないことが主な原因であり、今後の課題である。

#### 4.5.3 性能の検証とベースラインとの比較

ここでは、取得した物理パラメーターを使用してキャリブレーションする提案モデルについて、CL のブースターアンプの光強度をパラメーターとしてベースラインモデルと比較し、精度を検証する。ここでベースラインモデルとは、オペレーターが物理層のモデリングに関連する情報を取得せず、一般的な値を使って算出するモデルとする。キャリアリンクでは、Standard Single Mode Fiber (SSMF) に標準値を採用し、かつ EDFA の雑音指数を 7 dB に固定した。キャリブレーションしたモデルに対して大きな不一致が生じないように、最悪のケースの雑音指数の値を合理的方法で推定している。入力コネクタ損失と出力コネクタ損失は、それぞれ 1.5 dB と 0.5 dB と仮定した。損失係数は C バンドに沿って平坦であると仮定し、ファイバースパンの全損失をファイバースパンの長さで割ることによって推定した。この時、EDFA のフォトダイオードによって測定した値を活用し、トランスペアレントモード（スパンロスとアンプの利得が等しい）構成とした。各 EDFA は前のスパンの損失を回復し、ブースターは Q ファクタを最大にするように設定され、各 EDFA のチルトは受信端ノードでの信号パワースペクトルのチルトを最小にするように単一の値に設定される。トランスペアレントモード構成における EDFA のテレメトリ情報を表 4.2 に示す。AAL に属する EDFA の出力パワーは、第 1 のキャリアリンクエッジノードでのスペクトラム等化と受信機でのパワーバジェットを考慮し、固定値で設定した。キャリアリンクのブースター利得を 0.5 dB ステップで 12 dB から 20 dB まで段

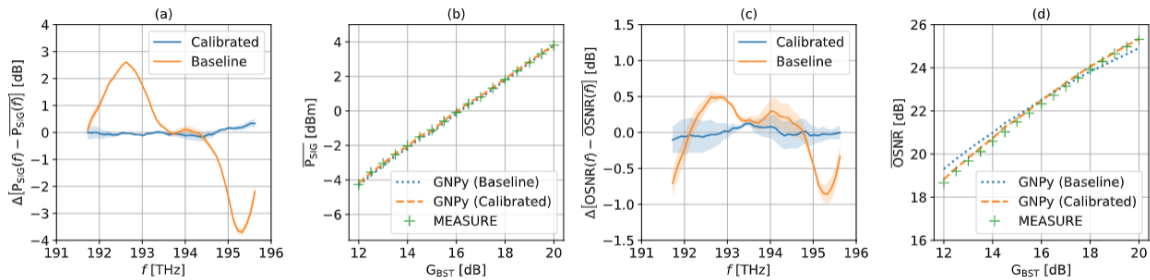


図 4.12 トランスペアレンシー構成でのパワースweep：キャリアリンクの検証とベースラインの比較。(a) 信号電力リップル誤差、(b) 信号電力平均、(c) OSNR リップル誤差、(d) OSNR 平均。

階的にスweepさせた。この時、他の EDFA はトランスペアレントモード構成を維持したまま行った。図 4.12 に、キャリアリンクの検証およびベースライン比較に関連する結果を、信号電力と OSNR 予測の観点から示す。図 4.12 (a) と図 4.12 (c) は、キャリブレーションとベースラインの 2 つのモデルの測定値のリップル誤差を周波数に対する

|                        | AAL 1<br>PRE | CL<br>BST | CL<br>ILA 1 | CL<br>ILA 2 | CL<br>PRE | AAL 2<br>BST |
|------------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|-----------|--------------|
| G [dB]                 | 21.1         | 19.4      | 15.5        | 14.9        | 16.8      | 16.4         |
| T [dB]                 | 0.0          | -1.3      | -1.3        | -1.3        | -1.3      | -1.5         |
| P <sub>OUT</sub> [dBm] | 13.0         | 19.3      | 19.5        | 19.5        | 19.5      | 12.0         |

表 4.2 トランスペアレントモード構成における EDFA テレメトリデータ

分布で示し、図 4.12 (b) と図 4.12 (d) は、2つのモデルの予測値と平均測定値を示す。この結果より、今回提案しているキャリブレーションで抽出したパラメーターを利用するモデルは、信号電力と OSNR 推定の両方の点でベースラインモデルを上回ることを示した。特に信号電力に関して、アンプのリップルとファイバーの周波数減衰をモデル化することで、受信ノードにおけるパワーバジェットを適切に推定できる点が重要である。これは、ROADM を使った等化など、ライン下流の伝送設計に影響を及ぼす。OSNR に関しては、固定値の雑音指数を適用するベースラインモデルに比べ、キャリブレーションを行うことによって、ブースターゲイン増加に伴う平均値を正確に確認することができる。また、キャリブレーションの際の測定値から得られる情報により（キャリブレーションモデルにおいて雑音指数が周波数に対し不変と見なしているに関わらず）OSNR プロファイルの周波数推定値を最適化することが可能となる。

1.2.1 節の伝送路システムの到達目標において、提案する最適化手法の精度として工事担当者を現地派遣して最適化を行う際の設計誤差以下に抑えることとしていた。本節の実験結果より、既存の設計誤差 ( $\pm 0.6$  dB) よりも QoT 予測誤差を改善 ( $\pm 0.3$  dB) できることを実証した。

#### 4.5.4 システム Q 値の揺らぎ

Integrated physical-aware method を用いて伝送路システムを最適化した後、5 時間の品質測定を実施した。図 4.13 に実験システムの 5 時間の Q 値変動を、図 4.14 に Q 値データの分布を示す。E2E の Q 値は 4 つの TRx で 1 分ごとに測定した。4 つの TRx 値の標準偏差 ( $3\sigma$ ) は 0.087、0.086、0.095、0.099 であった。これらの結果は、Q ファクタの変動が十分に小さく、本実験で行った Semi-automatic なファイバー切り替え作業後もシステムが安定していることを示している。

#### 4.5.5 運用に関する考察

この節では、4.5 節で紹介した実験結果に基づき、自動運用に関する考察を行う。

- i. 自動化実用の観点： Integrated physical-aware method により、光学系の必要な特性パラメーター（各スパン長のみ事前測定）を全て遠隔から自動的に取得することができた。可視化により、人間による目視検査・判断が可能となり、Semi-automatic なシーケンスにより、予期せぬ問題が発生した場合の復帰も可能である。
- ii. 自動化の利点： オペレーターが、サービス提供中の回線で工事を行うために一時的にサービスを中断する場合、メンテナンスのウィンドウは通常 2 時間である。この方法では、異なるタイムゾーンにいる遠隔オペレーターを介して 1 時間以内に切り替えとキャリブレーションを行うことができる。近年の光ネットワークは、ネットワーク状態の変化に対して大きな EOL マージンを割り当てて運用されることが一般的であり、ネットワークリソースが十分に活用されているとは言えない。本手法ではリアルタイムに物理パラメーターを取得することで、短時間で光ファイバーリンクシステムのプロビジョニングを行うことができるため、ネットワーク

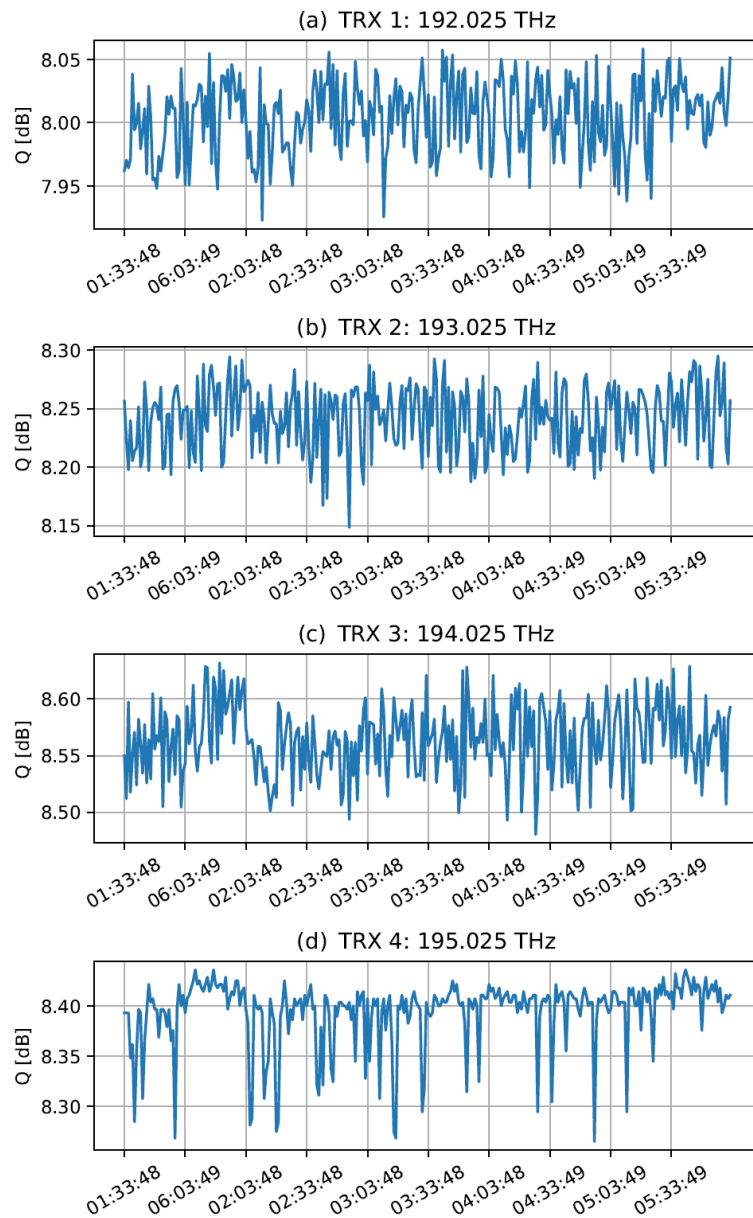


図 4.13 Q 値変動測定（5 時間）

状況に大きな変化（例えば、多チャンネル追加・削減、経年変化によるファイバー損失やアンプゲインの変化、32QAM や 64QAM などの新世代コヒーレント信号の波長多重化など）が発生したタイミングでプロビジョニングをやり直すだけで、状況に応じてネットワークリソースを最適に利用することができる。

## 4.6 故障個所特定への応用

このセクションでは、本章で紹介した Integrated physical-aware method を活用して物理的メトリクスと物理パラメーターの変化を明らかにすることで、故障個所特定に応用可能かどうかを論ずる。

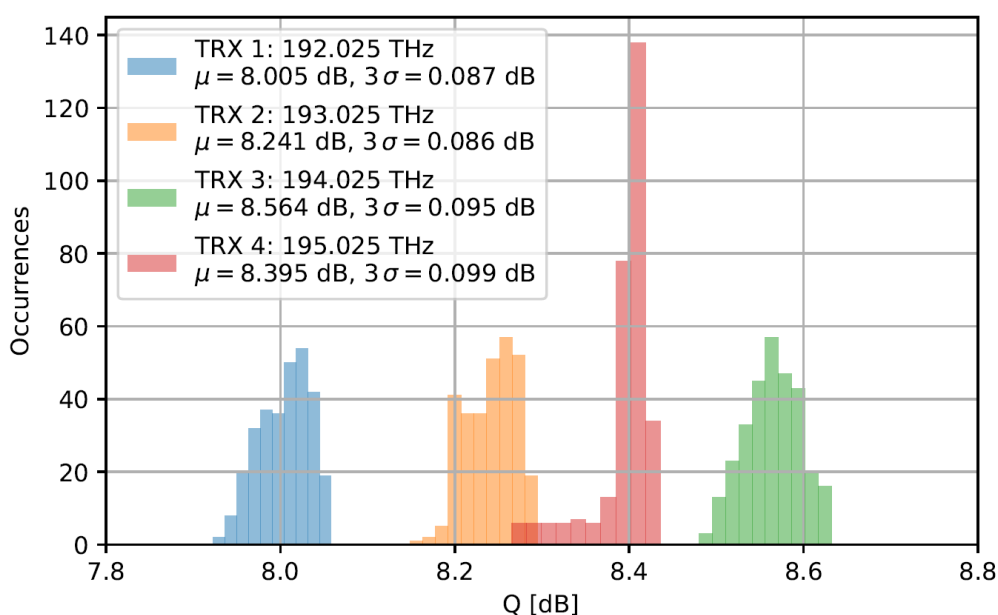


図 4.14 Q 値データの分布（5 時間）

#### 4.6.1 実験方法の説明、結果と考察

4.4 節に述べた 200 km のマルチスパン伝送路システムにおいて、意図的に損失を導入することにより、ファイバー損失コネクタの劣化と EDFA 雑音指数特性の劣化を模擬し、本手法が故障の重大性と位置を検出できることを検証した。1 つ目のユースケースに関しては、EDFA#2 の出力に 2 dB の異常損失を挿入する前と後でパワープロファイル

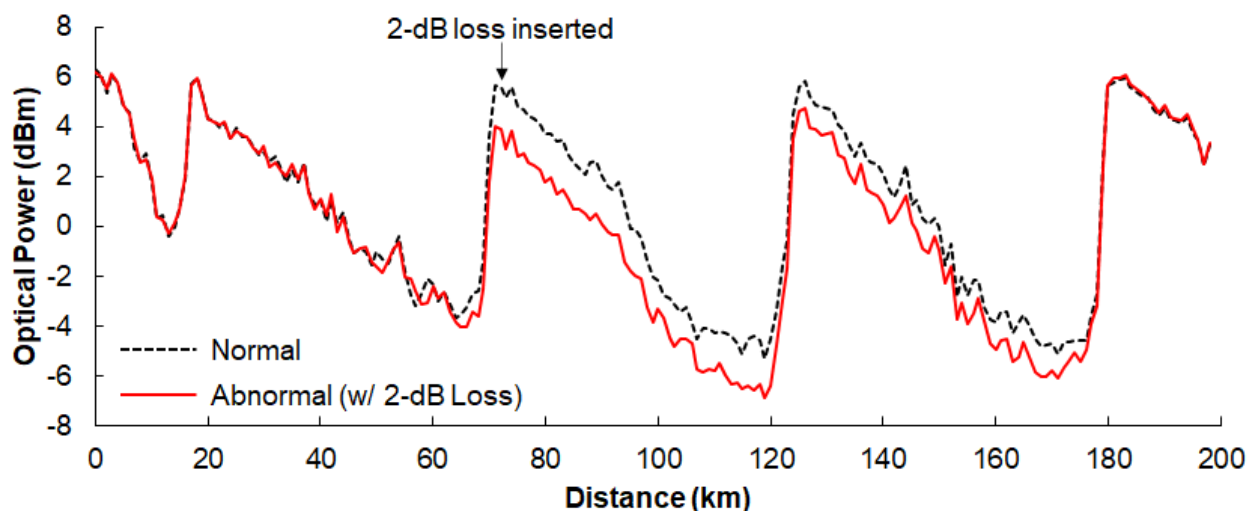


図 4.15 EDFA#2 出力部分に損失を追加することで光強度ロス障害を模擬した際の相対パワープロファイル推定値

を測定した。図 4.15 は、DLM によって推定された相対パワープロファイルを示している。黒の点線が異常損失挿入前の通常状態を示し、赤の実線が 2 dB ロスを印可した異常状態を示す。この図より印加された損失の大きさと位置が明確に識別できることが分かる。2 つ目のユースケースでは、OLS キャリブレーションを適用することで故障が発生した EDFA を特定する。図 4.16 (a, b) は、故障前の正常な状態における、実測値（データセット 2）と、OLS

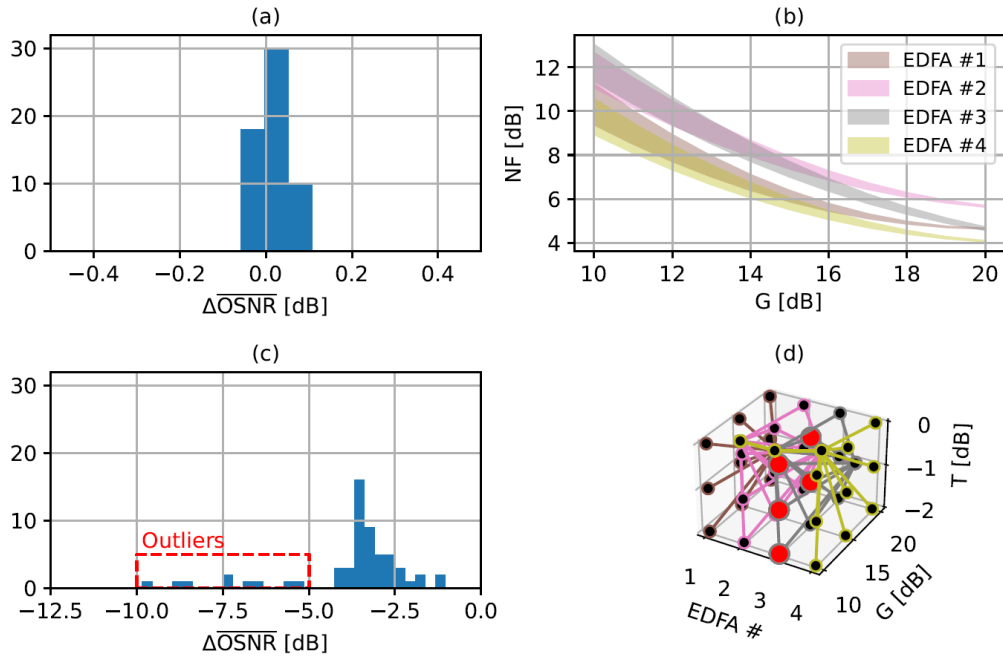


図 4.16 EDFA#2 の雑音指数特性劣化：(a) 故障前の平均 OSNR 誤差分布、(b) 故障前の平均雑音指数関数対目標利得、(c) 故障後の平均 OSNR 誤差分布、(d) 故障箇所の特定

キャリブレーションによって推定した物理パラメータを用いた GNP<sub>y</sub> 予測値との平均 OSNR 誤差分布  $\Delta \overline{\text{OSNR}}$  を示している。その後、EDFA#3 の中間段に 8 dB の減衰器を挿入し、雑音指数を意図的に劣化させた [95]。ここで故障発生を検知については、サービス提供中の TRx からの Pre-FEC BER 劣化により初めに検知され（ただし故障原因・箇所はこの時点では特定できない）、これを受けてオペレーターがユーザーとメンテナンス実施を合意し、通信サービスを一時中断して OLS キャリブレーション作業を行うものと仮定する。この時点で、4.4 節で行った実験と同じデータセットを収集し、平均 OSNR エラーの分布を再度評価する。評価結果を図 4.16 (c) に示す。雑音指数の劣化により、約 4 dB のバイアスが生じており、さらにこの分布には以前存在していなかった外れ値が現れている。これは雑音指数関数の平均値だけでなく、その形状（傾き）も変化していることを示唆している。図 4.16 (d) は OLS キャリブレーションを実施したときのデータセットに基づいて、各 EDFA の利得とチルトを 3 次元でプロットした図であり、EDFA#3 に異常が現れていることを示す。このように OLS キャリブレーション手順は雑音指数関数の形状の変化に敏感であるため、外れ値を特定することで、故障が発生したアンプを特定することが可能となる。この特性を利用することで、アンプの雑音指数に関連する故障の位置を現地に技術者を派遣することなく特定可能となり、故障したデバイスを最小限の稼働と時間で交換することができる。

#### 4.7 今後の課題

本実験では、Open ROADM MSA 規格の 400 Gbit/s 16QAM モードを用いた。DCI では、ファイバーあたりの伝送容量を増やすために、高いスペクトル効率を持つ 32QAM や 64QAM の適用が期待されている。しかし、これら

のモードは高い OSNR を必要とするため、キャリブレーション精度のさらなる向上が必須である。また、キャリブレーションに要する時間の短縮も重要な研究課題である。この論文では1本のポイント・ツー・ポイント回線を最適化した、キャリブレーション時間をさらに短縮できれば、限られたメンテナンス時間内でより大規模なネットワークを構築できるようになる。

もう1つの重要な研究領域は、構築されるネットワークの一部セグメントで運用ポリシーが異なる、伝送路システム機器の制御 IF が公開されていないケースに対する最適化手法とアーキテクチャである。

4.5 節で示した1時間以内でのプロビジョニングとメンテナンスはフィールド環境でテストされたが、4.3 節で示したハイブリッドコントローラーを使用したマルチベンダデバイス制御はラボ環境でのみ実施されたものである。これらすべての操作を遠隔地から自動制御できれば、光伝送におけるデジタルツインの好実用例となる。

ユーザーサポートの観点について、今回はファイバーリンクと EDFA にロスを意図的に追加し、故障箇所を特定することができることを示したが、今後は EDFA 内のレーザー出力が経年劣化により低下した場合等の他の種類の故障が発生した場合にこれらを検知可能かどうかは重要な研究テーマである。

## 4.8 まとめ

1.1.6 節に示したように、クラウド・AI/ML・ビッグデータ・アナリティクス・AR/VR 技術の急速な普及により、DCI 導入は世界の至る所で拡大を続けている。伝送路システムにおいても、広域に展開されたアンプや ROADM 等の機器を遠隔から最適化・制御できることで、新規伝送路のプロビジョニングタイム短縮や工事費用の削減が期待できることから、遠隔から自動運用するためのアーキテクチャ・モデル・モニタ技術に期待が集まっている。本章では、システムベンダに依存しない共通かつ自動の伝送路モニタ、パラメータ推定技術について論じ、フィールド実証などの実験結果を通して 1.2.1 節の伝送路システムに関する目標を達成したことを示した。

既設ベンダ以外の装置を用いて新設の伝送路システムを構築したいケースに対応する要件については、4.2 節にて、ML による手法ではなく、GN モデルを使った解析的手法により物理モデルを実現した。またこの手法は、特別なモニタを備えていない市販の光アンプに適用可能である。4.5 節にて、物理モデルに基づく伝送路設計に必要な全てのリンクパラメーター（ファイバーと光アンプ）を遠隔から取得可能であることを示し、かつ既存の設計誤差 ( $\pm 0.6$  dB) よりも QoT 予測誤差を改善 ( $\pm 0.3$  dB) できることを、フィールドファイバーを用いて実証した。

品質やパラメーターが不明な回線を使った提供に関する要件については、光送受信装置からの情報のみで、多スパンに跨ってパワープロファイルを測定可能な DLM を適用した。4.5.2 節にて、1 R 中継地点等、伝送路システムが設置されている拠点に対して工事担当者を派遣する必要がなく、リモートから自動でモニタ・最適化・設定できることを示した。また DLM による結果は OTDR のトレースとよく一致（平均二乗誤差は 0.45 dB）することをフィールドファイバーを用いて実証した。

従来運用手法に適合しつつ、迅速にプロビジョニングや不具合切り分けを実施する要件については、4.2 節に示した解析的手法（DLM と OLS calibration）を組み合わせた Integrated Physical Aware Method と、4.3 節の制御アーキテクチャを活用したプロビジョニング手順で対応した。4.6 節にて、意図的に損失を挿入することにより、ファイバー損失コネクタの劣化と、光アンプ雑音指数特性の劣化を模擬し、これをパワープロファイルの変化や OSNR 誤差分布の変化によって検出可能であることを示した。これにより、現地に技術者を派遣することなく故障の位置を特定可能となり、故障したデバイスを最小限の稼働と時間で交換することができる。

また、上記を連携させた検証を実施し、人による確認作業を含めた Semi-automatic な制御シーケンスを含め、異なるタイムゾーンにいる遠隔操作者が 1 時間未満で切り替えとキャリブレーションを実行できることを、Duke 大のフィールドファイバーを使って実証した。この際、自動化・最適化に必要なハードウェアの追加は伝送路システム当たり 1 式のみであり、Q ファクタの変動が十分に小さく、本実験で行った Semi-automatic なファイバー切り替え作業後（5 時間）もシステムが安定していることを確認し、到達目標を達成した。

## 5 結論

デジタルコヒーレント技術により性能向上・普及が急激に進んだ光伝送技術、ハードウェア・ソフトウェア分離により DC インフラを著しく効率化・高信頼化した仮想化技術の二つのイノベーションにより、ビデオ会議や SNS などのクラウドサービスはグローバルに普及し、拡大を続けている。近年では、現実世界の物体や環境から収集したデータを使い、仮想空間上に全く同じ環境を再現する「デジタルツイン」と呼ばれる技術の普及も進み、ユーザーに近いエッジ DC（同じ都市内など）を効率よく活用した大容量低遅延なネットワークに対する要望は今後拡大していくと予想されている。また、クラウドサービスやデジタルツインのための大量のデータを処理する DC は、地域の電力供給限界・立地不足やセキュリティ等の課題に直面し、分散配置・広域化が進んでおり、DC 間を接続するネットワークの需要が急増している。今後 AI 技術の普及によって莫大なコンピューティングリソースの消費が予測されている中、スケーラブルでサステナブルな将来のインフラ構築は喫緊の課題である。

本研究では上記の将来インフラの課題を受け、「従来手法では実現が難しい低遅延・拡張性・信頼性・柔軟性を同時に満たし、遠隔に設置されたキャリア・DC・クラウド事業者の機器を接続可能とし、オペレーター主導で自動運用などの新機能を追加可能な DCX インフラアーキテクチャを提案・実証する」ことを目的とした。本論文では、DCX の構成要素である光送受信装置（第2章）、コントローラー（第3章）、伝送路システム（第4章）ごとに目標実現に向けた課題を設定し、実用性の観点からそれぞれの到達目標を定め、フィールド実験を通して有効性を実証した。

第2章：光送受信装置については、異なったハードウェアコンポーネントを搭載した光送受信装置を用いて提供、様々な NOS や新しいアプリケーションに柔軟に対応でき、将来技術をオペレーター主導で追加可能、ユーザービルに光送受信装置を設置・運用、の3つの要件を満たすため、DC で用いられる運用管理方式と親和性の高い光送受信装置の制御アーキテクチャの実現を光送受信装置の課題とした。到達目標として、設定した3つの要件に適合し、かつ提案した装置アーキテクチャを用いて、エージェント送信～起動から監視制御に至る一連のシーケンスを現状運用と同様の10分以内に完了できることとした。ユーザー機器に DCX オペレーターのエージェントを送信し、起動から監視制御に至る一連のシーケンスを90秒で実施できることを Duke 大のフィールドファイバーを用いて確認し、3つの要件を満たしつつ、到達目標10分以内を達成した。

第3章：コントローラーについては、ユーザー TRx 特性を参照したプロビジョニング・リルートが可能、任意の多対多拠点間の多様なトポロジーに対応、距離や QoT に応じた最適モードの自動選択、の3つの要件を満たすため、ユーザー拠点に配置されるデジタルコヒーレントトランシーバーの伝送パラメーターを遠隔から設計・最適化する技術の実現をコントローラーの課題とした。到達目標として、設定した3つの要件に適合し、かつオンデマンドな WDM プロビジョニングを、人手を介さずに自動的に10分以内に完了すること、また WDM プロビジョニングの精度については、WDM プロビジョニングに起因する変動値をシステムの変動値と同じ桁に収めることとした。米国

COSMOS テストベッドのフィールドファイバーを用い、リンク性能が最大になるように TRx のパラメーターを設定するオンデマンドな WDM プロビジョニングを人手を介さず自動的に実施する実験を行い、3つの要件を満たしつつ、WDM プロビジョニング全体を6分以内に完了できることを実証した。また、この際に必要なマージンは全体で 0.7 dB であり、システムの GSNR 変動 0.1~0.2 dB と同じ桁に収まったことを確認し、到達目標を達成した。

第4章：伝送路システムについては、既設ベンダ以外の装置を用いて新設の伝送路システムを構築したいケースに対応、品質やパラメーターが不明な回線を使った提供、従来運用手法に適合しつつ、迅速にプロビジョニングや不具合切り分けを実施、の3つの要件を満たすため、システムベンダに依存しない共通のかつ自動の伝送路モニタ・パラメーター推定技術の実現を伝送路システムの課題とした。到達目標として、設定した3つの要件に適合し、かつ現用の伝送路システムから新規のシステムに切替工事を行う際、自動化・最適化に必要なハードウェアの追加を最小限（伝送路システム当たり1式程度）に抑えつつ、1時間以内に完了とした。この最適化手法の精度については、工事担当者を現地派遣して最適化を行う際の設計誤差以下に抑えることとした。Duke 大のフィールドファイバーを活用し、3つの要件を満たしつつ、人による確認作業を含めた Semi-automatic な制御シーケンスを含め、異なるタイムゾーンにいる遠隔操作者が1時間未満で切り替えとキャリブレーションを実行できることを実証した。またこの際、自動化・最適化に必要なハードウェアの追加は伝送路システム当たり1式のみであり、Q ファクタの変動が十分に小さく、本実験で行った Semi-automatic なファイバー切り替え作業後（5時間）もシステムが安定していることを確認し、到達目標を達成した。

以上より、光送受信装置については Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャ技術を、コントローラーについては伝送路の QoT に応じた自動光波長パス設計技術を、伝送路システムについては光ファイバーモニタ・物理レイヤモデルを用いた伝送路システム最適化技術を提案してその効果をフィールド実証し、これらの技術を用いて、光パス自動設計・制御の観点から、光伝送技術と仮想化技術を組み合わせた新しいインフラアーキテクチャを実現可能であることを明らかにした。

## 謝辞

本論文執筆にわたり適切なご指導 ご討論を頂きました NTT アクセスサービスシステム研究所主席研究員（北海道大学大学院情報科学院客員教授）吉田智暁先生に心より感謝申し上げます。また貴重な時間を割いて本研究に対し有益なご討論をしていただきました北海道大学大学院情報科学院大鐘武雄先生・齊藤晋聖先生・土橋宣典先生に心より感謝いたします。

研究を推進するにあたり、海外テストベッドとの交渉・調整や実施管理にご協力くださいました NTT 未来ねっと研究所の高杉耕一主席研究員、共に実験を推進下さった Columbia 大学の Gil Zussman 教授、Trinity College Dublin の Daniel Kilper 教授、Duke 大学の Tingjun Chen 助教授、NEC Laboratories America の Ting Wang 氏、NEC の朝日光司氏、第一章の光伝送技術の歴史やデジタルコヒーレント技術を活用した運用自動化について貴重なご意見を下さった NTT 未来ねっと研究所の木坂由明主席研究員、IOWN Global Forum にて DCX のユースケース策定を主導下さった NTT の川島正久氏に心から感謝申し上げます。

Auto Optical Path Provisioning や Integrated physical-aware method の理論検討や開発・実験においては、Politecnico di Torino 大学の Vittorio Curri 教授、NEC Laboratories America Lab の Yue-Kai Huang 氏・Ezra Ip 氏・Andrea D' Amico 氏・Giacomo Borraccini 氏、Duke 大学の Zehao Wang 氏、NTT 未来ねっと研究所の乾哲郎主任研究員・笹井健生准特別研究員・間野暢主任研究員・穴澤和也研究員・曾根由明主幹研究員・岡本聖司主任研究員・井上武特別研究員・松村達也研究員、NTT ネットワークイノベーションセンタの白井宗一郎氏・並木雅俊氏、NTT IOWN プロダクトデザインセンタの北村圭主任研究員と共に行ったものであり、実験実施にご協力を下さった NTT デバイスアメリカの磯村淳氏と水野隆之氏含め、関連いただいた皆様に深く感謝申し上げます。また実験に使用した Auto Optical Path Provisioning 技術のソフトウェア実装については、穴澤和也研究員・間野暢主任研究員・石田渉准特別研究員に、Integrated physical-aware method のソフトウェア実装については、笹井健生准特別研究員と Giacomo Borraccini 氏に実施いただきました。

Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャの開発においては、NTT ソフトウェアイノベーションセンタの石田渉准特別研究員、NTT イノベティブデバイスの鈴木立人氏・石田修氏・富澤将人氏、NTT 未来ねっと研究所の田中貴章特別研究員、NTT コミュニケーションズの桑原世輝氏・鈴木繁成氏・張笑誠氏・木村舟氏の皆様と共に行ったものです。引き続き商用開発については、NTT ネットワークイノベーションセンタの大西浩行氏をはじめとする光トランスポートシステムプロジェクトの皆様と共に行っております。ご協力くださった皆様に深く感謝申し上げます。オープンな光送受信装置の開発・標準化・普及推進においては、TIP の Arturo Mayoral Lopez de Le 氏、Meta の Diego Mari Moreton 氏、Vodafone の Jose Antonio Gomez 氏、MTN の Lloyd Mphahlele 氏・Steven Hill 氏、Telefonica の Juan Pedro Fernandez-Palacios Gimenez 氏・Oscar Gonzalez de Dios 氏・Edward Echeverry 氏、

Telia Company の Anders Lindgren 氏、DT の Dirk Breuer 氏、および NEC ・ IP infusion ・ Edgecore Networks ・ Accton Technology ・ Pegatron ・ CTCnet ・ Wistron ・ 富士通 ・ 富士通オプティカルコンポーネンツ ・ Lumentum ・ Broadcom のベンダ各社と共に行ったものです。TAI のソフトウェアアーキテクチャは、Cumulus Networks（現 NDIVIA）の Scott Emery 氏と NTT ソフトウェアイノベーションセンタの石田渉准特別研究員によって提案・実装されました。皆様のご尽力に深く感謝申し上げます。

筆者の博士論文作成を支えてくれた家族・親戚に深く感謝いたします。特に妻と息子には、度々の海外出張や早朝・深夜の会議、休日の論文執筆を支えていただきました。ここに感謝の意を表します。

本研究はこのような多くの方々のご指導 ご協力のもとで実現されたものであり、改めて皆様に感謝申し上げます。

## 6 付録

### 6.1 相互接続可能なモードの一覧

100 Gbit/s を超える標準化も進んでいる。400 Gbit/s DP-16QAM with concatenated FEC (CFEC) は、クラウド事業者からの要請に応じて、OIF 400 G-ZR [96] のモードとして選択された。200 Gbit/s については、CableLabs が DP-QPSK Open FEC(oFEC) をケーブルマルチシステムへのコヒーレント光アクセス用 PHY 仕様として採用した [97]。300 Gbit/s と 400 Gbit/s については、Open ROADM MSA が DP-8QAM oFEC と DP-16QAM oFEC をそれぞれ相互運用可能なモードとして採用した [25]。異なるベンダ間の相互接続は、100 から 400 Gbit/s までのすべての帯域で可能になった (表 6.1)。

| Capacity [bit/s] | 100G        | 200G       | 300G       | 400G  | 400G        |
|------------------|-------------|------------|------------|-------|-------------|
| FEC type         | SC-FEC      | oFEC       | oFEC       | CFEC  | oFEC        |
| FEC OH [%]       | 7           | 15         | 15         | 15    | 15          |
| FEC NCG [dB]     | 9.3         | 11.1       | 11.6       | 10.8  | 11.6        |
| Interoperability | CableLabs   | Cablelabs  | Open ROADM | OIF   | Open ROADM  |
| —                | Open ROADM  | Open ROADM | —          | ITU-T | ITU-T       |
| —                | ITU-T       | —          | —          | —     | IEEE802.3cw |
| —                | IEEE802.3ct | —          | —          | —     | —           |

表 6.1 相互接続可能なモードの一覧 (2021 年)

### 6.2 GN モデルの精度に関する議論と最新動向

GN モデルが提案された 2010 年前半には、NLI 雑音の全てをガウス雑音として計算することに対して反論もあり、R. Dar らによって NLI 雑音の主要項の一つである相互位相変調の影響を解析的に計算する方法が提案された [98]。その翌年 A. Carena らはこの方法を拡張し、自己位相変調・相互位相変調・四光波混合の影響それぞれを GN モデルと相関関数の和で表した Enhanced GN モデル (EGN) を提案した [99]。

$$G_{NLI}^{EGN} = G_{SCI}^{GN} + G_{SCI}^{corr} + G_{XCI}^{GN} + G_{XCI}^{corr} + G_{MCI}^{GN} + G_{MCI}^{corr} \quad (6.1)$$

ここで  $G$  は NLI 雑音の Power spectral density (PSD) であり、 $SCI \cdot XCI \cdot MCI$  はそれぞれ自己位相変調・相互位相変調・四光波混合に起因する項目を示す。 $GN \cdot corr$  はそれぞれ GN モデルと相関関数による項であることを示す。EGN によって、特にスパンが少ない領域での非線形光学係数の精度を向上することに成功したが、一方で計算量が増加するため、さらに翌年 P. Poggiolini らによって EGN から導出した閉形式の GN モデル補正式 (app EGN) が提案された [100]。この app EGN により、EGN により達成した NLI 雑音の計算精度と同程度で、かつ少ない計算量でシンプルに算出可能となった。近年はこの手法を C + L 等の多波長帯に適用する研究も盛んに行われ

ている [101, 102]。閉形式を用いず数値積分で GN モデルを計算すると 1 チャンネル当たり数分かかるため、多波長帯で 200 波を超える場合の計算時間は数時間に及ぶ。D. Semrau らは、チャンネル間誘導ラマン散乱のある光伝送システムに閉形式 GN モデルを適用し、SSFM 及び数値積分 GN モデルとの比較を行った結果、SSMF の C+L 全帯域にわたって非線形干渉強度の平均偏差が 0.2 dB であったと報告している [101]。また 2024 年には、A. D'amico らが GN モデルに誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman Scattering: SRS) の影響を加味した Generalized GN モデル [103] を先述した GNP<sub>y</sub> に適用したことで、C+L 帯の伝送設計についてもオープンソースでできるようになった。現在様々な機関によって検証が進められている。

### 6.3 Partially disaggregation と Fully Disaggregation

Disaggregated ネットワーク・アーキテクチャには、Aggregated、Partially disaggregated、Fully disaggregated といった複数のオプションがある [104]。Partially disaggregated モデルは、トランスポンダを Open Line System (OLS) から切り離し、Fully Disaggregated モデルは、OLS の各構成ブロックを分解する。ホワイトボックス・オープン IF 定義によるアプローチによってネットワークの各要素の設定パラメータを公開し、それらを汎用的に制御することで、Disaggregation のレベルを上げることができる。本章ではまず、ホワイトボックスを中継器とする Partially disaggregated モデルを想定し、Muxponder 部分のハードソフト分離について述べる (Fully disaggregated モデルについては 4 章で言及する)。

### 6.4 ホワイトボックス型光送受信装置ハードウェア

この節では、2 節の図 2.5 中に示した Switchponder Board 部分について解説する。図 6.1 は、図 2.5 のアーキテ

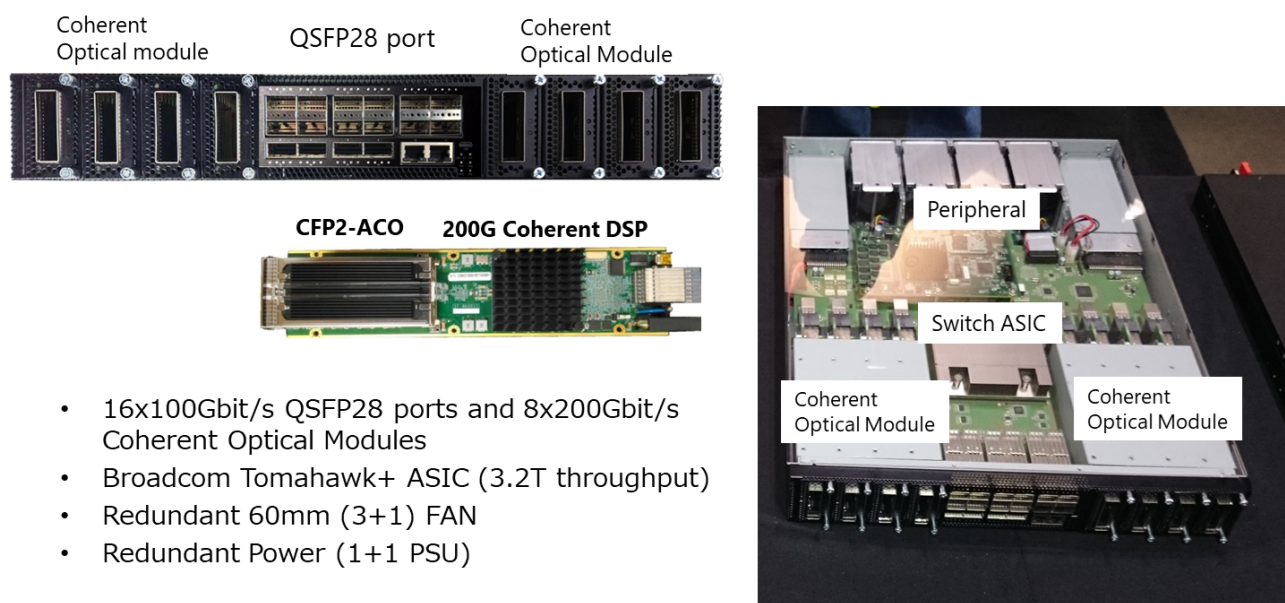


図 6.1 コヒーレントモジュールを実装可能な Whitebox Switch (OCP summit 2019、左の写真は Edgecore Neetworks 社提供)

クチャをベースに、Whitebox Switch 最大手の Edgecore Networks 社が開発した Cassini[105] と、NTT イノベティブデバイス社の DSP ASIC である ExaSPEED200 を Blade Design Suite [61] で実装した Coherent Optical Module を示す。右の写真にあるように、Cassini は Switch ASIC (Broadcom Tomahawk+) と QSFP28 を囲むように 8 つの Coherent Optical Module を収容可能なデザインになっている。X86 または ARM Processor/Open Kernel 上に、前節 2.2.1 で述べた TAI が実装されており、TAI を通して QSFP28 を制御するのと同様のアーキテクチャで CFP2-ACO や DSP を制御できる。

Cassini のように Switch ASIC を使って Line/Client port を収容する Switchponder に対して、Gearbox を使って Line/Client port をレイヤ 1 で時分割多重する装置は Muxponder と呼ばれる。400 Gbit/s のプラグブルコヒーレント TRx の普及を見据えて、Cassini のようなスイッチポンダだけでなく、キャリアに広く活用されているレイヤ 1 装置である Muxponder についてもハードウェア・ソフトウェアを分離した装置を実現する動きが始まった。図 6.2



- 16x100Gbit/s QSFP28 ports and 4x400Gbit/s CFP2-DCO
- 2 Sleds 1RU 19" 1.6 TB high transport capacity, hitless 1+1
- Redundant hot-swappable PSUs (1+1) with embedded FANs (3+3)
- The system allows users to install arbitrary open source or commercial software on it, such as ONIE and third-party NOS.

図 6.2 ハードウェア・ソフトウェアが分離された Muxponder (写真は Pegatron 社提供)

はハードウェア・ソフトウェアが分離された Disaggregated 400G Muxponder "Phoenix" (6.6 参照) の仕様に基づき、Whitebox Server 大手の Pegatron 社が開発した Endeavor とその基本仕様を示す。Cassini と同様、オープンなハードウェアを活用して冗長化を実現し、ONIE 等の OSS に対応する。またこのモデルは左右の Sled のそれぞれに制御 CPU が実装されており、スモールスタートが可能な構成となっている。

## 6.5 Cassini のトライアル・商用化

伝送性能についても、例えばテレフォニカはペルーにて Cassini を利用した 1200 km での 100 Gbit/s のフィールドトライアルを実施し、OFC2020 にその結果を報告している [106]。

同じころ、日本のクラウド事業者であるミクシィは Cassini に Goldstone を実装して商用 DCI に適用した事例を TIP summit にて報告し、最初の商用利用がスタートした [107]。その後、IP infusion は Cassini に OcNOS を適用

してホワイトボックスパケットトランスポンダのビジネスを展開し、これまでにアフリカのブルキナファソ [108]、南米チリの Mundo Pacifico[109] 等に商用導入を行った。

## 6.6 Disaggregated 400G Muxponder "Phoenix" の標準化

ホワイトボックスパケットトランスポンダの実績をうけ、TIP では次世代の 400G TRx を使った Disaggregated 400G Muxponder のプロジェクトが立ち上がった。筆者は TIP OOPT の Disaggregated Optical Systems (DOS) サブグループの Co-lead として、Cassini に続いて本プロジェクトを推進した。後に Phoenix と名付けられたこのプロジェクトは、2019 年 12 月に技術仕様を、2020 年 4 月に Vodafone ・ Telefonica ・ Telia Company ・ NTT Communications ・ DT ・ MTN による共同の RFI を発出している。図 6.3 (a) は Phoenix のイメージと仕様化に参加

Phoenix Open Optical Transponder  
Operator Designed



(a) Phoenixのイメージと仕様化参加オペレーター



(b) Gold badgeを獲得した製品版Phoenix

図 6.3 Disaggregated 400G Muxponder Phoenix (右図写真は Wistron 社提供)

したオペレーターを、(b) は Gold Badge を獲得した製品版 Phoenix を示す。Phoenix の High Level Requirement には、

- コンポーネントが Disaggregate され、ハードウェアとソフトウェアを異なる技術提供者から調達できること
- サードパーティーのプラグブルモジュールと完全な相互接続ができること
- 自動化のための Open API (Netconf や gRPC) を実装すること
- 市販のハードウェアと最適化された設計により、プラットフォームコストを削減できること

のように Disaggregation ・ オープンハードウェアの適用や自動化を見据えた Open な API に関する項目が並ぶ一方で、ODUk, OTUk, OPUk performance monitoring や Synchronization など、OTN に基づいた現行のキャリア運用にも対応できることが求められている [110]。DOS に参加しているオペレーターは 2020 年 4 月の RFI 発出後、ハードウェア、ソフトウェア、全体ソリューションの提案を計 10 件受領し、提案ごとにベンダからの製品説明、技術観点でのオペレーターチーム議論、オペレーターとベンダ間議論を実施した。また、実機を用いた検証も行って 2022 年 6 月にコミュニティとしての推奨要件を策定し、detailed Technical Requirement Document (dTRD) としてベ

ンダ各社に公開した。

dTRD では Phoenix に対する詳細な技術仕様を物理要件・光伝送規格・制御・監視運用・オープン性等の観点で約 200 項目の要件として整理した。オープン性については、Phoenix の特徴であるハードウェア・ソフトウェア分離の項目として TAI のサポート、ONIE 等のオープンなインストールツールの対応可否等が盛り込まれた [110]。dTRD 公開後、Phoenix Badge (dTRD の仕様を満たしているか) 認定の公募が行われた。2022 年 10 月に台湾のホワイトボックスベンダである Wistron 社の Galileo FlexT と、TAI/Goldstone をベースに開発された NEC 社の NEC NOS が Bronze Badge を取得した。Bronze Badge 取得のクライテリアは「机上で仕様を満たしていること」であり、検証はベンダ主体で実施する。2023 年 10 月には、同プロダクトで Silver Badge を取得 [111] した。Silver Badge のクライテリアは「オペレーター主導による実機検証で仕様を満たしているか」であり、アフリカ最大のモバイルオペレーターである MTN と NTT コミュニケーションズによる実機検証が評価されて受賞につながった [112]。2025 年 2 月には、MTN と NTT コミュニケーションズによる実網での検証が評価され、最高位にあたる Gold Badge を取得した。MTN は、南アフリカ DC において MTN の商用ラインシステムに Phoenix を Alien Wavelength 接続し、NOS 起動時間など実運用に即した試験を行って良好な成績を収めたと報告した。NTT コミュニケーションズは、東京の商用 DCI にて 1 年以上にわたる長期安定動作検証を実施し、Phoenix 起因による不具合は発生せず、Phoenix が商用として十分な品質をクリアしたと報告している。

これらの Badge 認定はいずれも、光送受信装置での世界初の認定である。

## 参考文献

- [1] 末松安晴, “わが国の光ファイバ通信研究 (後編).” [https://www.jsps.go.jp/file/storage/grants/j-grantsinaid/22\\_letter/data/news\\_2015\\_vol4/p18-22.pdf](https://www.jsps.go.jp/file/storage/grants/j-grantsinaid/22_letter/data/news_2015_vol4/p18-22.pdf), 2015.
- [2] 中川清司, 中沢正隆, 相田一夫, 萩本和男, 石川秀樹 (監修), “光増幅器とその応用,” オーム社, 1992.
- [3] 井上恭, “ファイバー通信のための非線形光学,” 森北出版株式会社, 2011.
- [4] S. Okamoto and S. Sato, “Optical path cross-connect systems for photonic transport networks,” *Global Telecommunications Conference (GLOCOM)*, 1993.
- [5] 妹尾尚一郎, “電気情報通信学会知識ベース 光パスネットワーク.” [https://www.ieice-hbkb.org/files/05/05gun\\_05hen\\_01.pdf](https://www.ieice-hbkb.org/files/05/05gun_05hen_01.pdf), 2018.
- [6] 鈴木扇太, 宮本裕, 富澤将人, 坂野寿和, 村田浩一, 美野真司, 柴田充文, 渋谷真, 福知清, 尾中寛, 星田剛司, 小牧浩輔, 水落隆司, 久保和夫, 宮田好邦, 神尾亨秀, “光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発,” *電子情報通信学会*, vol. 95, no. 12, 2012.
- [7] 岡本聖司, “博士学位論文: デジタルコヒーレント光伝送における超多値信号の高精度歪補償に関する研究.” <https://tohoku.repo.nii.ac.jp/record/127800/files/180327-OKAMOTO-5467-1.pdf>, 2018.
- [8] 井上恭, “光増幅と非線形.” [https://opt.comm.eng.osaka-u.ac.jp/inoue/pdf/lecture\\_inoue/20150730-2.pdf](https://opt.comm.eng.osaka-u.ac.jp/inoue/pdf/lecture_inoue/20150730-2.pdf), 2011.
- [9] A. Carena, G. Bosco, V. Curri, P. Poggiolini, M. T. Taiba, and F. Forghieri, “Statistical characterization of PM-QPSK signals after propagation in uncompensated fiber links,” in *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, 2010.
- [10] A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini, and F. Forghieri, “Modeling of the impact of nonlinear propagation effects in uncompensated optical coherent transmission links,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 10, pp. 1524–1539, 2012.
- [11] P. Poggiolini, G. Bosco, A. Carena, V. Curri, Y. Jiang, and F. Forghieri, “The GN-Model of fiber nonlinear propagation and its applications,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 694–721, 2014.
- [12] F. Vacondio, C. Simonneau, L. Lorcy, J. Antona, A. Bononi, and S. Bigo, “Experimental characterization of Gaussian-distributed nonlinear distortions,” in *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, 2011.
- [13] Telecom Infra Project, “GNPy: Optical Route Planning Library.” <https://gnpy.readthedocs.io/en/>

master/.

- [14] A. Ferrari, M. Filer, K. Balasubramanian, Y. Yin, E. Le Rouzic, J. Kunderát, G. Grammel, G. Galimberti, and V. Curri, “GNPy: an open source application for physical layer aware open optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 6, pp. C31–C40, 2020.
- [15] K. Kaeval, T. Fehenberger, J. Zou, S. L. Jansen, K. Grobe, H. Griesser, J. P. Elbers, M. Tikas, and G. Jervan, “QoT assessment of the optical spectrum as a service in disaggregated network scenarios,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 10, pp. E1–E12, 2021.
- [16] K. Anazawa, T. Inoue, T. Mano, K. Obana, E. Oki, and H. Nishizawa, “First demonstration of an SDN controller for optical-circuit-switched datacenter networks,” in *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, accepted, 2025.
- [17] A. Gouin, A. Dupas, L. G. Renom, A. Benabdallah, F. Boitier, and P. Layec, “Real-time optical transponder prototype with autonegotiation protocol for software defined networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 9, 2021.
- [18] CFP MSA, “CFP MSA Management Interface Specification Version 2.6.” <https://www.gigalight.com/downloads/standards/cfp-msa-management-interface-specification.pdf>, 2017.
- [19] OIF, “Common Management Interface Specification (CMIS) Revision 5.2.” <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-CMIS-05.2.pdf>, 2022.
- [20] T. Sasai, M. Nakamura, E. Yamazaki, S. Yamamoto, H. Nishizawa, and Y. Kisaka, “Digital longitudinal monitoring of optical fiber communication link,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 8, pp. 2390–2408, 2022.
- [21] T. Tanimura, S. Yoshida, K. Tajima, S. Oda, and T. Hoshida, “Concept and implementation study of advanced DSP-based fiber-longitudinal optical power profile monitoring toward optical network tomography [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 10, 2021.
- [22] V. Curri, “GNPy model of the physical layer for open and disaggregated optical networking [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, no. 6, pp. C92–C104, 2022.
- [23] T. Tanimura, S. Yoshida, K. Tajima, S. Oda, and T. Hoshida, “Fiber-longitudinal anomaly position identification over multi-span transmission link out of receiver-end signals,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2726–2733, 2020.
- [24] O. Ishida, K. Takei, and E. Yamazaki, “Power efficient DSP implementation for 100G-and-beyond multi-haul coherent fiber-optic communications,” in *Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, 2016.

- [25] OpenROADM, “OpenROADM MSA optical specifications (v7.0).” [https://github.com/OpenROADM/OpenROADM\\_MSA\\_Public/wiki](https://github.com/OpenROADM/OpenROADM_MSA_Public/wiki), 2024.
- [26] Telecom Infra Project, “Open Optical & Packet Transport.” <https://telecominfraproject.com/oopt/>.
- [27] IOWN Global Forum, “The IOWN Global Forum and Telecom Infra Project Announce Collaboration on Optical Networking.” <https://iowngf.org/press-releases/the-iown-global-forum-and-telecom-infra-project-announce-collaboration-on-optical-networking/>.
- [28] 小林 正幸, “LINE のネットワークをゼロから再設計した話.” <https://www.janog.gr.jp/meeting/janog43/program/line/>, 2019.
- [29] D. Clark and S. Shenker and A. Falk, “GENI research plan.” <https://groups.geni.net/geni/raw-attachment/wiki/OldGPGDesignDocuments/GDD-06-28.pdf>, 2007.
- [30] ONF, “Open Networking Foundation.” <https://www.opennetworking.org/>.
- [31] Open Compute Project, “Open Compute Project.” <https://www.opencompute.org/>.
- [32] LINE ヤフー, “オープンソース化するハードウェア～ヤフーが OCP サーバを導入するまで～.” <https://techblog.yahoo.co.jp/operation/2015-10-ocp/>, 2015.
- [33] LINE ヤフー, “データセンタネットワークの取り組みと Facebook Backpack.” [https://techblog.yahoo.co.jp/advent-calendar-2017/datacenternetwork\\_backpack/](https://techblog.yahoo.co.jp/advent-calendar-2017/datacenternetwork_backpack/), 2017.
- [34] Open Compute Project, “Switch Abstraction Interface.” <https://github.com/opencomputeproject/SAI>.
- [35] Open Compute Project, “Software for Open Networking in the Cloud (SONiC).” <https://github.com/sonic-net/SONiC?tab=readme-ov-file>, 2017.
- [36] Microsoft, “SONiC: マイクロソフトの世界規模のクラウドを支えるネットワーク スイッチ ソフトウェア.” <https://azure.microsoft.com/ja-jp/blog/sonic-the-networking-switch-software-that-powers-the-microsoft-global-cloud/>.
- [37] M. Filer, J. Gaudette, Y. Yin, D. Billor, Z. Bakhtiari, and J. Cox, “Low-margin optical networking at cloud scale [Invited],” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 10, pp. C94–C108, 2019.
- [38] AWS, “リージョンとアベイラビリティーゾーン.” [https://aws.amazon.com/jp/about-aws/global-infrastructure/regions\\_az/](https://aws.amazon.com/jp/about-aws/global-infrastructure/regions_az/).
- [39] James Hamilton, “AWS re:Invent 2014: AWS Innovation at Scale with James Hamilton.” [https://www.youtube.com/watch?v=JIQETrFC\\_SQ](https://www.youtube.com/watch?v=JIQETrFC_SQ).

- [40] 総務省, “データセンター間等におけるデータ通信量の現状と見通し等に関する調査研究について.” [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000942814.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000942814.pdf), 2024.
- [41] Lumen Technologies, “Lumen, Google and Microsoft create new on-demand, optical interconnection ecosystem.” <https://www.prnewswire.com/news-releases/lumen-google-and-microsoft-create-new-on-demand-optical-interconnection-ecosystem-301847861.html>.
- [42] zayo, “waves on demand.” <https://www.zayo.com/resources/dedicated-bandwidth-in-24-hours-with-waves-on-demand/>.
- [43] ビー・ビー・バックボーン, “BBB spectrum.” <https://www.bbbbackbone.co.jp/spectrum/>.
- [44] 日経, “世界でデータセンター建設制限 電力網への負荷深刻.” <https://www.nikkei.com/prime/ft/article/DGXZQ0CB1312L0T10C24A2000000>, 2024.
- [45] 資源エネルギー庁, “電力需要について.” [https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/2024/056/056\\_005.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/056/056_005.pdf), 2024.
- [46] NTT 報道発表, “データセンタエクステンションの実現に向け APN を活用した光波長パス設定技術を確認し 実証～自動化により光波長パスの設計・設定を数時間から数分へと大幅に短縮～.” <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/13/231013a.html>.
- [47] 川島 正久, “Internet of Data Centers with IOWN APN.” <https://mpls.jp/2022/presentations/mpls2022-InternetOfDC.pdf>, 2022.
- [48] ITU-T, “The tactile Internet: ITU-T Technology Watch Report.” [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf), 2014.
- [49] K. Kawazoe, “What’s IOWN?—Change the world,” *NTT TechJournal Review*, vol. 18, pp. 17–26, 2020.
- [50] NEC, “デジタルツインとは？ 製造業や都市などでの活用事例 8 選.” [https://www.nec-solutioninnovators.co.jp/sp/contents/column/20220701\\_digital-twin.html](https://www.nec-solutioninnovators.co.jp/sp/contents/column/20220701_digital-twin.html).
- [51] Amazon Web Service, “AWS Wavelength.” [https://aws.amazon.com/wavelength/?nc1=h\\_ls](https://aws.amazon.com/wavelength/?nc1=h_ls).
- [52] NDIVIA, “Evolving from network simulation to data center digital twin.” <https://developer.nvidia.com/blog/evolving-from-network-simulation-to-data-center-digital-twin/>.
- [53] LIGHTWAVE, “Surveying the New Optical Form Factors for 400 Gigabit Ethernet.” <https://www.lightwaveonline.com/optical-tech/transmission/article/16673747/surveying-the-new-optical-form-factors-for-400-gigabit-ethernet>, 2017.
- [54] OpenConfig, “Terminal device properties found issues—new release proposed v0.2.0.” <https://github.com/openconfig/public/issues/910>, 2023.

- [55] Y. Sone, H. Nishizawa, S. Yamamoto, M. Fukutoku, and T. Yoshimatsu, “Systems and technologies for high-speed inter-office/datacenter interface,” in *Proc. SPIE1031*, p. 101310D, 2017.
- [56] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga, and A. Hirano, “Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 5, pp. 56–65, 2012.
- [57] NTT 報道発表, “グローバルパートナーと連携し通信技術のオープンスタンダード化を促進 ～ICT リソースの仮想化を容易にする、データセンタ間光伝送ネットワークのハードウェアとソフトウェア分離技術を Facebook 等と共同開発、TIP summit 2018 に動態展示～.” <https://group.ntt.jp/newsrelease/2018/10/16/181016c.html>.
- [58] Telecom Infra Project, “TAI (Transponder Abstraction Interface) GitHub.” <https://github.com/Telecominfraproject/oopt-tai>.
- [59] M. Long, “Open optical packet transponder leveraging OCP networking technology.” <https://www.youtube.com/watch?v=kr0sB7va9M4>, 2018.
- [60] W. Ishida, “IP infusion and NEL: state-of-the-art optical technology.” [https://www.youtube.com/watch?v=W1UvnXz-\\_ck](https://www.youtube.com/watch?v=W1UvnXz-_ck), 2018.
- [61] NTT イノベティブデバイス, “NTT エレクトロニクス社、業界初の 16nm 100G/200G 超低電力コヒーレント DSP を発表.” <https://www.ntt-innovative-devices.com/new/information/2016/3/industry-first-16nm-100g-200g-coherent-dsp.html>, 2016.
- [62] 松岡伸治, 加納敏行, 尾中寛, 水落隆司, 和田尚也, “平成 21 年度 総務省 ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「超高速光伝送システム技術の研究開発（デジタルコヒーレント光送受信技術）」報告書.” [https://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictR-D/pdf/100825\\_22.pdf](https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/pdf/100825_22.pdf), 2010.
- [63] A. Matsushita, M. Nakamura, F. Hamaoka, S. Okamoto, and Y. Kisaka, “High-spectral-efficiency 600-Gbps/carrier transmission using PDM-256QAM format,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 470–476, 2019.
- [64] NTT イノベティブデバイス, “ホワイトボックス型光伝送装置向けオープンソース OS「Goldstone」に 貢 献.” <https://www.ntt-innovative-devices.com/new/information/2019/11/ntt-electronics-contributes-goldstone-open-source-network-os-for-disaggregated-coherent-transponders.html>.
- [65] Telecom Infra Project, “Goldstone open NOS GitHub.” <https://github.com/oopt-goldstone/goldstone-mgmt>.
- [66] Open Network Linux, “Open network linux platform infrastructure repository.” <https://github.com/>

opennetworklinux/ONLP.

- [67] DANOS project, “DANOS.” <https://www.danosproject.org/>.
- [68] Open Networking Foundation, “Stratum.” <https://www.opennetworking.org/stratum/>.
- [69] Telecom Infra Project, “Phoenix: an open white-box L0/L1 transponder.” <https://telecominfraproject.com/oopt/>.
- [70] IOWN Global Forum, “Open all-photonic network functional architecture.” <https://iowngf.org/technology/>, 2023.
- [71] C. Qin, B. Guan, K. Edwards, J. Kong, R. Morgan, Y. Yin, A. Pathak, M. Banda, S. J. G. Chandrababu, J. Jain, and J. Gaudette, “Interoperable 400ZR deployment at cloud scale,” in *Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, p. W3H.2., 2023.
- [72] 松村達也, 間野暢, 穴澤和也, 西沢秀樹, 曾根由明, 高杉耕一, Z. Wang, and T. Chen, “コンテナソフトウェアによるトランスポンダ遠隔制御のフィールド実証,” in *電子情報通信学会 総合大会, IEICE*, 2025.
- [73] K. Kaeval, S. L. Jansen, F. Spinty, K. Grobe, H. Griesser, T. Fehenberger, M. Tikas, and G. Jervan, “Characterization of the optical spectrum as a service,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, no. 5, pp. 398–410, 2022.
- [74] K. Kaeval, J. Myyry, K. Grobe, H. Grießer, and G. Jervan, “Concatenated GSNR profiles for end-to-end performance estimations in disaggregated networks,” in *Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, 2022.
- [75] L. Liu, R. Casellas, T. Tsuritani, I. Morita, S. Okamoto, R. Martinez, and R. Munoz, “Field and lab trials of PCE-based OSNR-aware dynamic restoration in multi-domain GMPLS-enabled translucent WSON,” *Optics Express*, vol. 19, no. 27, 2011.
- [76] A. M. Fagertun and B. Skjoldstrup, “Flexible transport network expansion via open wdm interface,” 2013.
- [77] T. Mano, A. D’Amico, E. Virgillito, G. Borracini, Y.-K. Huang, K. Anazawa, H. Nishizawa, T. Wang, K. Asahi, and V. Curri, “Modeling transceiver BER-OSNR characteristic for QOT estimation in short-reach systems,” in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 2023.
- [78] H. Nishizawa, T. Sasai, T. Inoue, K. Anazawa, T. Mano, K. Kitamura, Y. Sone, T. Inui, and K. Takasugi, “Dynamic optical path provisioning for alien access links: architecture, demonstration, and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 4, pp. 136–142, 2023.
- [79] N. R&D ウェブサイト, “光波長パス伝送モード自動最適化技術 (AOPP : Automatic Optical Path Provisioning).” [https://www.rd.ntt/iown\\_tech/post\\_51.html](https://www.rd.ntt/iown_tech/post_51.html), 2024.

- [80] D. Raychaudhuri, I. Seskar, G. Zussman, T. Korakis, D. Kilper, T. Chen, J. Kolodziejewski, M. Sherman, Z. Kostic, X. Gu, H. Krishnaswamy, S. Maheshwari, P. Skrimponis, and C. Gutterman, “Challenge: COSMOS: a city-scale programmable testbed for experimentation with advanced wireless,” in *Proceedings of ACM MobiCom*, 2020.
- [81] T. Chen, J. Yu, A. Minakhmetov, C. Gutterman, M. S. S. Zhu, S. Santaniello, A. Biswas, I. Seskar, G. Zussman, and D. Kilper, “A software-defined programmable testbed for beyond 5g optical-wireless experimentation at city-scale,” *IEEE Network*, vol. 36, no. 2, pp. 90–99, 2022.
- [82] Y. K. Huang, Z. Wang, E. Ip, Z. Qi, G. Zussman, D. Kilper, K. Asahi, H. Kageshima, Y. Aono, and T. Chen, “Field trial of coexistence and simultaneous switching of real-time fiber sensing and 400GbE supporting DCI and 5G mobile services,” in *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, paper W3H.4, 2023.
- [83] Z. Wang, D. Kilper, and T. Chen, “Transfer learning based ROADM EDFA wavelength-dependent gain prediction using minimized data collection,” in *Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, 2023.
- [84] OIF, “Implementation Agreement for Coherent CMIS, OIF-C-CMIS-01.0.” <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-C-CMIS-01.0.pdf>, 2020.
- [85] IOWN Global Forum, “AI-integrated communications use case release-1.” [https://iowngf.org/wp-content/uploads/formidable/21/IOWN-GF-RD-AIC\\_Use\\_Case\\_1.0.pdf](https://iowngf.org/wp-content/uploads/formidable/21/IOWN-GF-RD-AIC_Use_Case_1.0.pdf), 2021.
- [86] アンリツ, “光測定器の種類とOTDR測定原理.” [https://dl.cdn-anritsu.com/ja-jp/test-measurement/files/Product-Introductions/Product-Introduction/iNIP\\_OTDR\\_01.pdf](https://dl.cdn-anritsu.com/ja-jp/test-measurement/files/Product-Introductions/Product-Introduction/iNIP_OTDR_01.pdf), 2013.
- [87] J. Lu, G. Zhou, Q. Fan, D. Zeng, C. Guo, L. Lu, J. Li, C. Xie, C. Lu, F. N. Khan, and A. Pak Tao Lau, “Performance comparisons between machine learning and analytical models for quality of transmission estimation in wavelength-division-multiplexed systems,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 4, pp. B35–B44, 2021.
- [88] F. N. Khan, “Machine learning-enabled intelligent fiber-optic communications: major obstacles and the way forward,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 4, pp. 122–128, 2023.
- [89] 国土交通省, “自動運転のレベル分けについて.” <https://www.mlit.go.jp/common/001226541.pdf>.
- [90] G. Borraellini, Y.-K. Huang, A. D’ Amico, T. F. de Lima, E. Ip, V. Curri, T. Wang, and K. Asahi, “Optical line physical parameters calibration in presence of EDFA total power monitors,” in *Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, pp. 1–3, IEEE, 2024.
- [91] T. Sasai, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, “Performance limit of fiber-longitudinal power profile estimation

- methods,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 11, pp. 3278–3289, 2023.
- [92] T. Sasai, M. Takahashi, M. Nakamura, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, “Linear least squares estimation of fiber-longitudinal optical power profile,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 42, no. 6, pp. 1955–1965, 2024.
- [93] T. Mano, A. D’ Amico, E. Virgillito, G. Borracchini, Y.-K. Huang, K. Kitamura, K. Anazawa, A. Masuda, H. Nishizawa, T. Wang, K. Asahi, and V. Curri, “Accuracy of nonlinear interference estimation on launch power optimization in short-reach systems with field trial,” in *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, 2022.
- [94] H. Nishizawa, T. Mano, T. F. De Lima, Y.-K. Huang, Z. Wang, W. Ishida, M. Kawashima, E. Ip, A. D’ Amico, S. Okamoto, T. Inoue, K. Anazawa, V. Curri, G. Zussman, D. Kilper, T. Chen, T. Wang, K. Asahi, and K. Takasugi, “Fast WDM provisioning with minimal probing: the first field experiments for DC exchanges,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 16, no. 2, pp. 233–242, 2024.
- [95] L. E. Kruse, S. Kuhl, A. Dochhan, and S. Pachnicke, “Experimental validation of machine learning-based joint failure management and quality of transmission estimation,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 15, no. 6, pp. 1–9, 2023.
- [96] OIF, “OIF 400ZR.” <https://www.oiforum.com/technical-work/hot-topics/400zr-2/>.
- [97] CableLabs, “P2P coherent optics physical layer 2.0 specification.” <https://www.cablelabs.com/specifications/P2PC0-SP-PHYv2.0>.
- [98] R. Dar, M. Feder, A. Mecozzi, and M. Shtaif, “Properties of nonlinear noise in long, dispersion-uncompensated fiber links,” *Optics Express*, vol. 21, no. 22, pp. 25685–25699, 2013.
- [99] A. Carena, G. Bosco, V. Curri, Y. Jiang, P. Poggiolini, and F. Forghieri, “EGN model of non-linear fiber propagation,” *Optics Express*, vol. 22, no. 13, pp. 16335–16362, 2014.
- [100] P. Poggiolini, G. Bosco, A. Carena, V. Curri, Y. Jiang, and F. Forghieri, “A simple and effective closed-form gn model correction formula accounting for signal non-gaussian distribution,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 459–473, 2015.
- [101] D. Semrau, R. Killey, and P. Bayvel, “A closed-form approximation of the gaussian noise model in the presence of inter-channel stimulated raman scattering,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 9, pp. 1924–1936, 2019.
- [102] H. Buglia, M. Jarmolovicius, A. Vasylichenkova, E. Sillekens, L. Galdino, R. Killey, and P. Bayvel, “A closed-form expression for the gaussian noise model in the presence of inter-channel stimulated loss and

- fibre length,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 11, pp. 3577–3586, 2023.
- [103] A. D’Amico, B. Correia, E. London, E. Virgillito, G. Borraccini, A. Napoli, and V. Curri, “Scalable and disaggregated GGN approximation applied to a C+L+S optical network,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3499–3511, 2022.
- [104] V. Lopez, W. Ishida, A. Mayoral, T. Tanaka, O. G. de Dios, and J. P. Fernandez-Palacios, “Enabling fully programmable transponder white boxes,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 2, p. A214–A223, 2020.
- [105] Edgecore Networks, “Edgecore Networks announces general availability of Cassini open packet transponder.” <https://www.edge-core.com/news-inquiry.php?cls=1&id=352>.
- [106] G. Francia, R. Nagase, W. Ishida, Y. Sone, L. Kumar, S. Krishnamohan, and V. Lopez, “Disaggregated packet transponder field demonstration exercising multi-format transmission with multi-vendor, open packet optical network elements,” in *Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, p. Th3A.1., 2020.
- [107] 石田 渉, 馬淵 俊弥, “ホワイトボックス伝送の動向と商用利用について.” [https://www.janog.gr.jp/meeting/janog45/application/files/1515/7982/5113/019\\_whitetrapon\\_Toshiya\\_Mabuchi.pdf](https://www.janog.gr.jp/meeting/janog45/application/files/1515/7982/5113/019_whitetrapon_Toshiya_Mabuchi.pdf), 2020.
- [108] ACCESS, “VTS、アフリカ初となる、TIP の「Cassini」ソリューションの商用展開にあたり、IP Infusion を選定.” <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000270.000011476.html>, 2020.
- [109] 日本経済新聞, “ACCESS 子会社 IP Infusion、Mundo Pacifico の White Box 型光ネットワーク導入に選定.” [https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP538161\\_S0A720C2000000/](https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP538161_S0A720C2000000/), 2020.
- [110] Telecom Infra Project, “Phoenix technical requirements.” [https://cdn.mediavalet.com/usva/telecominfraproject/sAfTn2Db0ECNgtnKk8u4NQ/mgX-F6NtNka8Dapg3jDwCA/Original/20191210\\_Phoenix\\_Technical\\_Requirements\\_-\\_Telecom\\_Infra\\_Project.pdf](https://cdn.mediavalet.com/usva/telecominfraproject/sAfTn2Db0ECNgtnKk8u4NQ/mgX-F6NtNka8Dapg3jDwCA/Original/20191210_Phoenix_Technical_Requirements_-_Telecom_Infra_Project.pdf).
- [111] NEC, “NEC awarded the Telecom Infra Project’s Silver Badge” for its disaggregated 400G transponder solution.” [https://www.nec.com/en/press/202310/global\\_20231012\\_02.html](https://www.nec.com/en/press/202310/global_20231012_02.html).
- [112] MTN, “Innovating for a Connected Africa: NEC Corporation and MTN Launch Phoenix, the Continent’s First 400G Optical Transponder.” <https://www.mtn.com/innovating-for-a-connected-africa-nec-corporation-and-mtn-launch-phoenix-the-continents-first-400g-optical-transponder/>.